Г.А.Николаев, В.А.Винокуров

СВАРНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Г.А.Николаев, В.А.Винокуров

СВАРНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ

ПОД РЕДАКЦИЕЙ АКАДЕМИКА Г. А. НИКОЛАЕВА

Допущено Государственным комитетом СССР по народному образованию в качестве учебника для студентов вузов, обучающихся по специальности «Оборудование и технология сварочного производства»

Москва
«Высшая школа»
1990

ББК 30.4
Н 63
УДК 624.014.25

Рецензенты: кафедра «Машины и автоматизация сварочного производства» Ростовского-на-Дону института сельскохозяйственного машиностроения (зав. кафедрой д-р техн. наук, проф. В. Ф. Лукьянов); д-р техн. наук, проф. О. И. Стеклов (Московский институт нефти и газа имени И. М. Губкина)

Н $\frac{2704060000\ (4309000000)-295}{001\ (01)-90}$ 209—90

ISBN 5-06-001555-6 © Г. А. Николаев, В. А. Винокуров, 1990

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящая книга представляет собой учебник по сварным конструкциям, составленный в соответствии с Программой специальных дисциплин для высших учебных заведений по специальности 12.05 «Технология и оборудование сварочного производства», М., 1985, Сборник № 1, утвержденный Учебно-методическим советом по высшему образованию 28.01.85 г.

Учебник написан на основе учебных пособий: Николаев Г. А., Куркин С. А., Винокуров В. А. Прочность сварных соединений и деформации сварных конструкций (1982) и Николаев Г. А., Куркин С. А., Винокуров В. А. Технология изготовления, автоматизация производства и проектирование сварных конструкций (1983).

Настоящая книга представляет собой первую часть учебника «Сварные конструкции». В ней изложены вопросы о материалах, соединениях, деформациях сварных конструкций и о проектировании отдельных элементов.

Вторая часть учебника будет посвящена вопросам технологии изготовления, автоматизации производства и контролю качества сварных конструкций.

Изложение материала в учебнике строго соответствует пунктам программы. В нем значительно расширен раздел свариваемых металлов, сплавов, неметаллических материалов; технологических процессов соединений, в частности лучевых, в твердом состоянии и др. Несколько сокращено освещение результатов научно-исследовательских работ, проводимых как в СССР, так и за рубежом.

В помощь студентам при выполнении курсового проекта кратко рассмотрены вопросы строительной механики. Подчеркнуто тесное взаимодействие расчетно-конструкторской и производственно-экономической проблем.

По сравнению с ранее вышедшей книгой (1982) расширен круг примеров по разработке конструкций, к каждой главе приложен список вопросов для самоконтроля. Рассмотрено содержание лабораторного практикума.

Изложение основано на формулировках, принятых в машиностроительной практике, однако представлены и

СНиПы, используемые многими другими организациями, проектирующими объекты, применяемые в строительстве.

Учебник может быть также использован специалистами в области сварных конструкций. Однако количество справочного материала в нем ограничено, так как задачей учебника являлось научить студента умению осуществлять инженерные операции при использовании дополнительного материала из других источников.

Главы 1, 2, 3, 4, 5, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 написаны акад. Г. А. Николаевым, главы 6 и 7 — проф. В. А. Винокуровым.

Авторы считают своим долгом отметить и выразить признательность рецензентам первой части книги — кафедре сварки Ростовского-на-Дону института сельскохозяйственного машиностроения (зав. каф. д-р техн. наук, проф. Лукьянов В. Ф.) и зав. кафедрой МИНГ им. Губкина д-р техн. наук, проф. Стеклову О. И., а также всем научным и производственным организациям, материалы которых использованы в настоящем учебнике и в самую первую очередь Институту электросварки им. Е. О. Патона.

Критика и пожелания по дальнейшей работе будут с благодарностью приняты авторами. Все замечания следует направлять по адресу: *101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., д. 29/14, издательство «Высшая школа».*

Авторы

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

В тексте приняты следующие условные обозначения:

P — сосредоточенная сила;
q — распределенная нагрузка;
S — усилие в элементе;
r — отношение S_{min}/S_{max};
M — изгибающий момент;
N — продольная сила;
Q — поперечная сила;
σ — нормальное напряжение;
τ — касательное напряжение;
$[\sigma]_р$ — допускаемое нормальное напряжение при растяжении в основном металле;
$[\sigma]_{сж}$ — допускаемое нормальное напряжение при сжатии в основном металле;
$[\tau]$ — допускаемое касательное напряжение в основном металле;
$[\sigma']_р$ — допускаемое нормальное напряжение при растяжении в шве;
$[\tau']$ — допускаемое касательное напряжение в шве;
$\sigma_в$ — предел прочности основного металла;
$\sigma'_в$ — предел прочности шва (соединения);
$\sigma_т$ — предел текучести;
σ_r — предел выносливости при цикле r;
σ_{-1} — предел выносливости при симметричном цикле;
ε — относительная деформация;
δ — удлинение при разрыве;
$a_н$ — ударная вязкость основного металла;
$a'_н$ — ударная вязкость шва;
R — расчетное сопротивление (по СНиПу);
$K_т$ — теоретический коэффициент концентрации напряжений;
$K_э$ — эффективный коэффициент концентрации напряжений;
W — момент сопротивления;
E — модуль упругости;
l — пролет, длина;
s — толщина детали;
A — площадь поперечного сечения;
I — момент инерции поперечного сечения;
r — радиус инерции;
λ — гибкость элемента при сжатии;
K — катет углового шва;
βK — расчетное сечение углового шва;
φ — коэффициент понижения допускаемых напряжений при сжатии;
γ — коэффициент понижения допускаемых напряжений при повторных переменных нагрузках;
T — температура;

$S_п$ — статический момент части сечения относительно оси, проходящей через центр тяжести;
Н — ньютон;
кН — килоньютон;
МН — меганьютон;
МПа — мегапаскаль;

Нагрузки и усилия даны в кН (1 кН соответствует 100 кг), моменты — в кН·м; напряжения и модули упругости — в МПа (1 МПа=10 кг/см²), ударная вязкость — в МДж/м².

ГЛАВА 1

РАЗВИТИЕ СВАРКИ В КОНСТРУКЦИЯХ

§ 1.1. ИСТОРИЧЕСКИЕ ЭТАПЫ ПРИМЕНЕНИЯ СВАРКИ В КОНСТРУКЦИЯХ

Развитие сварки конструкций имеет яркую историю.

В 1882 г. талантливый русский изобретатель Н. Н. Бенардос впервые предложил способ соединения и разделения металлов непосредственно действием электрического тока с применением угольной дуги. Этот способ сварки угольной дугой носит его имя.

В 1888—1890 гг. горный инженер Н. Г. Славянов предложил метод электрической сварки металлов металлическим электродом.

Широкое развитие и большое народнохозяйственное значение дуговая сварка металлов получила после Великой Октябрьской социалистической революции.

В 30-е годы началось интенсивное применение сварки вместо клепки в конструкциях, что обеспечило экономию металла на 25. . .30%, повысило производительность труда, освободила рабочего от тяжелого труда молотобойца. Новая технология стала не только рекомендованной, но и обязательной в ряде объектов строительных конструкций.

Со второй половины 30-х годов сварка получила новое широкое применение в различных отраслях машиностроения. В эти годы в СССР было сооружено несколько сварных железнодорожных мостов.

С 40-х годов в СССР в результате деятельности Института электросварки АН УССР и в первую очередь его основателя Е. О. Патона (именем которого назван институт), а также ряда других организаций начинается успешное применение в промышленности автоматической сварки под флюсом, которое сыграло выдающуюся роль в период Великой Отечественной войны при создании вооружения, а позднее во всех отраслях народного хозяйства.

Институт электросварки им. Е. О. Патона, возглавляемый в течение 35 лет академиком АН СССР, президентом АН УССР Б. Е. Патоном, является координационным и

научным центром, осуществляющим в стране научно-техническую политику по вопросам сварки. Он обладает большим числом передовых научных лабораторий, конструкторских бюро, а также производственными предприятиями, реализующими научные разработки лабораторий в металле.

Замечательные достижения СССР в развитии передовых методов сварки — создание технологических процессов сварки в среде углекислого и инертных газов; контактная сварка рельсов непрерывным оплавлением, газопроводов установками «Север»; электрошлаковая, полуавтоматическая сварка порошковым электродом; плазменная и микроплазменная сварка; сварка взрывом; диффузионная и высокочастотная сварка; вибронаплавка; индустриальный метод производства сварных листовых конструкций и многие другие усовершенствованные методы — вывели нашу Родину на передовое место в мире.

§ 1.2. МАСШТАБЫ ПРИМЕНЕНИЯ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В СССР

Настоящее время характеризуется следующими параметрами, определяющими состояние сварочного производства.

В 1985 г. объем производства сварных конструкций определялся цифрой 67 млн. т, в том числе 46 млн. т — промышленность и 21 млн. т — строительство. Кроме того, был выполнен значительный объем наплавочных работ преимущественно для целей ремонта объемом 55 тыс. т.

Значителен процент роста работ, выполненных механизированными и автоматизированными способами сварки, в особенности в промышленности (67. . .90%). Низок процент указанных работ в строительстве (19,3%).

Сваривают конструкции из прочных сталей и цветных сплавов, что обеспечивает уменьшение массы металла в 1,5. . .2 раза и более. Успешно сваривают конструкции из пластмасс (трубопроводы).

Около 700 тыс. сварщиков заняты на автоматах, полуавтоматах и ручных способах сварки.

В одиннадцатой пятилетке планомерно осуществлялся перевод на сварные изделия литых и клепаных конструкций, что позволило получить в период 1982—1986 гг. 1,4 млн. т сварных конструкций.

В одиннадцатой пятилетке сварочное производство развивалось преимущественно экстенсивным путем. Увеличилось число работающих, но процент лиц, выполняющих ручные операции, уменьшался медленным темпом.

Все еще нерационально используются при сварке конструкций сварочные материалы (в 1,5 раза и более больше на тонну конструкций) по сравнению с ведущими капиталистическими государствами.

Положительным фактором является рост за пятилетие выпуска сварочной проволоки, в частности легированной и малого диаметра (0,8. . .1,4 мм); более широкое внедрение автоматической и полуавтоматической сварки, проектирование работ на базе модульного принципа.

Развитие сварки происходит в тесном единении техники и науки.

Головной институт в области сварки — ИЭС им. Е. О. Патона — координирует все научно-исследовательские работы в области сварки НИИ, заводов, вузов.

Значительные работы по созданию сварочного оборудования проводятся Всесоюзным научно-исследовательским институтом электросварочного оборудования (ВНИЭСО), Всесоюзным научно-исследовательским институтом автогенного машиностроения (ВНИИАвтогенмаш), Центральным научно-исследовательским институтом технологии машиностроения (ЦНИИТМАШ); в области проектирования сварных конструкций — ЦНИИпроектстальконструкция, МГТУ им. Н. Э. Баумана, Киевский политехнический институт и т. д.

В СССР свыше 60 вузов осуществляют подготовку инженеров сварочной специальности по двум основным направлениям — на машиностроительной и металлургической базах.

Научные организации СССР по сварке поддерживают связь с Центральным сварочным институтом в Братиславе (ЧССР), с Центральным сварочным институтом в Галле (ГДР), с Высшей технической школой по машиностроению им. Отто фон Генрике в Магдебурге (ГДР), с Институтом сварки в Париже (Франция), с Политехническим институтом в г. Осака (Япония), с рядом НИИ в США.

В СССР с применением сварки выполнен ряд выдающихся сооружений: доменные печи кубатурой 5000 м³, резервуары емкостью до 50 тыс. м³, атомные реакторы; телебашня высотой свыше 350 м; мост им. Е. О. Патона через р. Днепр с общей длиной свыше 900 м; висячий мост пролетом 600 м; перегрузочные краны грузоподъемностью до 1200 т; перекрытия из сварных элементов пролетом 80 м. Разработаны типовые сварные металлоконструкции: фермы и балки, что позволило сократить количество видов изделий.

При проектировании сварных конструкций большое

внимание необходимо уделять выбору материала с целью получения изделий с учетом наименьшей его массы; применять по возможности прочные металлы; учитывать специфику работы объектов, например при пониженных или повышенных температурах, в активных средах во всевозможных экстремальных условиях.

Проект конструкции должен быть технологичен, т. е. удобен для выполнения. Необходимо соответствие между применяемыми формами и удобством их выполнения.

В сложных конструкциях будет применяться комбинация разных материалов: различных марок сталей, цветных сплавов, использование полимеров, керамики, в некоторых случаях двухслойных металлов и т. д. Всегда необходимо помнить о большом государственном значении экономии металла при производстве большой массы конструкций. Казалось бы, незначительная экономия металла в результате принятого решения для одного объекта может быть распространена на их большое количество. А это может дать большое сбережение при крупносерийном выпуске.

Очень важно предвидеть не только первичную экономию материалов, но и экономию при дальнейшем его использовании в эксплуатации, принимать меры против эрозии, коррозии, случайных повреждений и т. д.

Правильное решение вопроса изготовления объекта должно быть основано на комплексном подходе.

Большое значение в отношении экономии массы материала имеет правильный выбор генеральной системы и схемы объекта. Необходим возможно более точный расчет проектируемой конструкции с позиций определения в ней напряженного состояния, остаточных деформаций после сварки, влияющих на точность изготовления.

Более широко следует применять наплавки и напыление в новых объектах.

Прогрессивное развитие сварочной технологии неизбежно базируется на общеэкономическом решении производственных задач — минимума трудозатрат, сокращения ручного труда, экономии энергетических и других ресурсов. Технологический проект изготовления должен быть тщательно проработан, начиная с заготовок, сборочных приспособлений, организацией или использованием имеющихся механизированных или автоматизированных линий, участков; анализом применения роботизации.

На теоретической базе должны быть предварительно решены вопросы о сварочных режимах. Самое большое внимание должно быть уделено вопросам сварки высокопрочных сталей, цветных сплавов, имеющих высокую чувствительность к термическому эффекту сварки, к образованию закалочных структур, а впоследствии — хрупких разрушений. Должны быть разработаны технологические процессы с учетом металлургических факторов, теплофизических и химических процессов.

Контроль должен осуществляться непрерывно в процессе выполнения работ. Надлежит добиться, чтобы выполнение соответствовало утвержденному технологическому проекту.

После окончания изготовления объект должен быть подвергнут визуальному контролю — определению требуемых после сварки размеров швов, выявлению видимых дефектов, деформаций изделия и т. д. Необходимо использование физических методов контроля качества сварных соединений и материалов без разрушения. Предпочтительно использование ультразвуковой аппаратуры, а также применение рентгеновских, электромагнитных и других методов контроля.

При выполнении всех видов работ необходимо учитывать требования экологии и эргономики.

Работа завершается отчетом с экономическими показателями и технической оценкой полученных результатов.

§ 1.3. БЛИЖАЙШИЕ ЗАДАЧИ

1. Создание рациональных сварных конструкций под углом зрения требований металлоемкости, качества, надежности путем уточнения инженерных расчетов прочности, рационализации форм конструкций и соединений с использованием ЭВМ и САПР, применения сталей повышенного качества, цветных сплавов (титановых алюминиевых и др.), композитных материалов, порошковых материалов и композиций разнородных материалов, уменьшения отходов производства, рационализации типов профилей (гнутых, штампованных, прессованных), внедрения типизации, унификации, стандартизации конструкций.

2. Дальнейшее расширение сварочных технологических процессов в производстве с целью частичной замены литья и поковок для уменьшения массы изделий. Продолжение проникновения сварочной технологии в приборостроение, радиотехнику, радиоэлектронику, где производится сварка ультратонких изделий из трудно свариваемых материалов.

3. Внедрение прогрессивных высокопроизводительных процессов сварки при создании автоматизированных и ме-

ханизированных линий, по изготовлению конструкций, участков при роботизации.

4. Внедрение прогрессивных технологических процессов сварки с целью замены ручного труда, особенно в строительстве (дуговая автоматическая сварка в среде защитных и инертных газов, порошковой проволокой; контактная; электронно-лучевая; лазерная; сварка трением; диффузионная; ультразвуковая и сварка токами радиочастоты; механизированная пайка, а также плазменные процессы).

Совершенствование методов сварки в экстремальных условиях — в космосе; на большой глубине; в зонах, недосягаемых человеком.

5. Повышение уровня сварочного оборудования, источников питания на базе использования электроники, автоматики, сварочных материалов (электродов, флюсов), газорежущих аппаратов.

6. Дальнейшее совершенствование всех видов контроля качества продукции, обеспечивающих надежность работы в эксплуатации (механические, химические, физические).

Особое внимание должно быть обращено на бережное отношение к увеличению сроков эксплуатации конструкций путем уменьшения потерь от коррозии, применением всевозможных покрытий и других защитных средств.

7. Проведение НИР в научных и промышленных организациях по дальнейшему повышению качества сварных конструкций, экономии в трудозатратах и сбережении металла и энергии.

8. Развитие на базе сварочной технологии новых их видов. Примером этому служат: электрошлаковый переплав; электроотливка; сварка взрывом; индустриализация изготовления крупногабаритных оболочковых объектов, разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона.

Развитие процесса лазерной сварки создало технологию лазерной резки и лазерной термообработки.

Проведение работ по триаде «Научное исследование — конструкторская разработка — производственное завершение» в одном комплексе обеспечит дальнейший прогресс сварочной технологии.

Все дальнейшее развитие сварных конструкций, технологии и оборудования проводится на основе фундаментальных наук: физики, химии, теории прочности, электроники, автоматики с использованием передовых методов вычислительной техники (ЭВМ, микропроцессоров, САПР), позволяющих решать сложные задачи проектирования и в 2...3 раза уменьшить срок выхода готового проекта. Особенно широко автоматизированное проектирование внедряется в спецтехнику тяжелых машиностроительных конструкций и в приборостроение.

Контрольные вопросы к главе 1

1. В каких организациях в СССР и за рубежом развивались научные работы в области сварки?
2. Какие методы, обеспечивающие экономию металлов, следует рекомендовать разработчикам конструкций?
3. Назовите основные экономические процессы, обеспечивающие замену ручного труда механизированным.

ГЛАВА 2

МАТЕРИАЛЫ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

§ 2.1. СТАЛИ

Механические свойства материалов определяют их несущую способность, т. е. способность воспринимать заданные нагрузки. Они в значительной степени характеризуют величину массы материала изделий и оказывают непосредственное влияние на их стойкость.

К основным механическим свойствам, как правило, относят следующие.

1. Предел прочности, называемый нередко временным сопротивлением $\sigma_в$, представляющий собой отношение максимального усилия P, испытываемого при разрыве, к первоначальной площади поперечного сечения испытуемого образца A.

2. Предел текучести $\sigma_т$ — максимальное напряжение, при котором деформации переходят из упругой в пластическую область. Ввиду того что при испытании различных материалов, в том числе и сталей, отсутствует четкая граница перехода в пластическую область, $\sigma_т$ определяют как величину напряжений $\sigma_{0,2}$, вызывающую остаточную пластическую деформацию 0,2% при испытаниях образцов стандартной формы.

3. Относительное удлинение при разрыве δ_5, определяемое на образцах стандартной формы.

4. Ударная вязкость $a_н$, характеризующаяся сопротивлением ударным воздействиям стандартных образцов с надрезами, имеющими различную остроту.

Существует ряд испытаний помимо указанных, определяющих хрупкий и вязкий характер разрушений, сопротив-

Таблица 2.1

Нормируемый химический состав углеродистых сталей обыкновенного качества по ГОСТ 380—71

Марка стали	Содержание элементов, %				
	C	Mn	Si	P	S
				не более	
Ст0	Не более 0,23	—	—	0,07	0,06
Ст2пс Ст2сп	0,09...0,15	0,25...0,50	0,05...0,07 0,12...0,30	0,04	0,05
Ст3кп Ст3пс Ст3сп Ст3Гпс	0,14...0,22	0,30...0,60 0,40...0,65 0,40...0,65 0,80...1,10	Не более 0,07 0,05...0,17 0,12...0,30 Не более 0,15	0,04	0,05
Ст4кп Ст4пс Ст4сп	0,18...0,27	0,40...0,70	Не более 0,07 0,05...0,17 0,12...0,30	0,04	0,05
Ст5пс Ст5сп	0,28...0,37	0,50...0,80	0,05...0,17 0,15...0,35	0,04	0,05
Ст5Гпс	0,22...0,30	0,80...1,20	Не более 0,15	0,04	0,05

ляемость распределению образовавшихся в металле трещин, сопротивление при переменных нагрузках с учетом различных амплитуд изменения усилий от S_{min} до S_{max} и ряд других.

Следует всегда помнить, что механические свойства сталей тесно связаны с их химическими свойствами и термообработкой.

§ 2.2. МАРКИ СТАЛЕЙ, МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

Углеродистые стали подразделяют на низкоуглеродистые (С=0,09. . .0,25%), среднеуглеродистые (С=0,25. . . 0,46%) и высокоуглеродистые (С=0,46. . .0,75%).

Низкоуглеродистые стали чаще применяют в строительных конструкциях; среднеуглеродистые — в машиностроении; высокоуглеродистые — в инструментальном производстве.

Углеродистые стали обыкновенного качества, согласно ГОСТ 380—71, разделяются на три группы:

группа А — сталь поставляется по механическим свойствам;

группа Б — сталь поставляется по химическим свойствам;

группа В — сталь поставляется по механическим и химическим свойствам (стали этой группы более дорогостоящие и применяются для ответственных конструкций).

Нормированный химический состав углеродистых сталей обыкновенного качества приведен в табл. 2.1.

В сталях содержатся добавки кремния и марганца, а также вредные примеси — сера и фосфор, содержание которых в стали ограничивают.

Сталь получают главным образом из смеси чугуна, выплавляемого в доменных печах, со стальным ломом. Сталь плавят в конверторах, мартеновских и электрических печах. Хорошее качество конверторной стали обеспечивается продувкой кислородом. Наивысшие сорта сталей получают их переплавом: электрошлаковым, вакуумным дуговым, электронно-лучевым, плазменно-дуговым.

Плавка стали без достаточного количества раскислителей сопровождается выделением газов. Такая сталь называется кипящей (буквы «кп» в марке стали). Стали, раскисленные добавками кремния и алюминия, остывают в изложницах без интенсивного выделения газов и называются спокойными (буквы «сп» в марке стали). Промежуточные стали — полуспокойные — обозначаются буквами «пс».

Спокойные и полуспокойные стали по механическим свойствам, как правило, различаются между собой незначительно. Спокойные стали обладают более стабильными свойствами, кипящие — менее однородны, но более склонны к хрупким разрушениям. Производство спокойных сталей дороже. Их обычно применяют в ответственных конструкциях.

Нормированные показатели механических свойств углеродистых сталей обыкновенного качества приведены в табл. 2.2.

Диаграмма деформации низкоуглеродистых сталей (рис. 2.1) имеет горизонтальный участок, который определяет значение предела текучести $\sigma_т$. Эта площадка теку-

Таблица 2.2

Нормируемые показатели механических свойств углеродистых сталей обыкновенного качества по ГОСТ 380—71

Марка стали	Предел прочности (временное сопротивление) $\sigma_в$, МПа	Предел текучести $\sigma_т$, МПа			Относительное удлинение коротких образцов δ_5, %			Изгиб на 180° при диаметре оправки d
		толщина образца s, мм						
		до 20	20...40	40...100	до 20	20...40	40...100	до 20
Ст0	310	—	—	—	23	22	20	$d=2s$
ВСт2пс ВСт2сп	340...440	230	220	210	32	31	29	$d=0$ (без оправки)
ВСт3кп	370...470	240	230	220	27	26	24	$d=0,5s$
ВСт3пс	380...490	250	240	230	26	25	23	
ВСт3сп	380...490	250	240	230	26	25	23	
ВСт3Гпс	380...500	250	240	230	26	25	23	
ВСт4кп	410...520	260	250	240	25	24	22	$d=2s$
ВСт4пс	420...540	270	260	250	24	23	21	
ВСт4сп	420...540	270	260	250	24	23	21	
ВСтГ4сп	420...540	270	260	250	24	23	21	
ВСт5пс	500...640	290	280	270	20	19	17	$d=3s$
ВСт5сп	500...640	290	280	270	20	19	17	
ВСт5Гпс	460...600	290	280	270	20	19	17	

Примечания: 1. Для листовой и фасонной стали толщиной $s \geq 20$ мм значение предела текучести допускается на 10 МПа ниже по сравнению с указанным. 2. При $s<20$ мм диаметр оправки увеличивается на толщину образца.

чести варьирует в пределах 0,2. . .2,5%. Если на диаграмме деформации стали нет горизонтального участка, то $\sigma_т$ определяется условно значением напряжения, при котором остаточные деформации после снятия нагрузки составляют 0,2%.

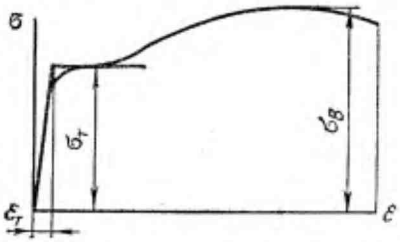


Рис. 2.1. Диаграмма деформации низкоуглеродистой стали

Деформации распределяются по длине образца неравномерно. Они концентрируются на некотором участке, где возникают наибольшие сокращения площади поперечного сечения, называемые «шейкой». Этим объясняются различные требования к относительному удлинению при разрыве длинных и коротких образцов.

Относительное удлинение δ_5 коротких образцов имеет большие значения, чем относительное удлинение δ_{10} длинных образцов.

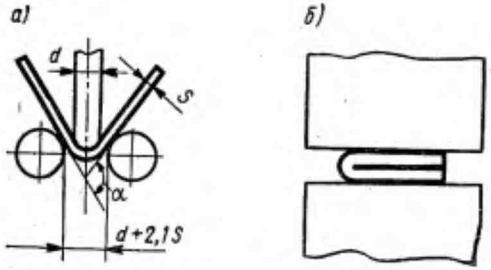


Рис. 2.2. Схема испытаний на изгиб

Пластичность сталей оценивают также испытанием на изгиб до образования первой трещины, как показано на рис. 2.2, *а*. Так, согласно ГОСТ 380—71 (см. табл. 2.2), трещины должны отсутствовать при изгибе до параллельности сторон ($\alpha=180°$). При изгибе до соприкосновения сторон ($\alpha=0$) догиб продолжают между параллельными плоскостями (рис. 2.2, *б*).

Марку Ст0 присваивают стали, отбракованной по каким-либо признакам. Эту сталь используют в неответственных конструкциях.

В ответственных конструкциях часто применяют сталь Ст3сп. Цифра в марке стали характеризует содержание в

Таблица 2.3

Ударная вязкость по ГОСТ 380—71 листовой стали

Толщина образца, мм	Ударная вязкость, МДж/м², не менее	
	при температуре +20 °С	при температуре —20 °С
5...9	0,8	0,4
10...25	0,7	0,3
26...40	0,5	—

ней углерода. С повышением номера стали возрастают пределы прочности и текучести и уменьшается относительное удлинение. С увеличением толщины металла значения $\sigma_в$, $\sigma_т$ и δ несколько снижаются.

Сопротивление удару $a_н$ (ударной вязкости) определяется путем ударного изгиба стандартных образцов на копре при комнатных и низких температурах. Ударная вязкость выражается отношением работы разрушения к площади поперечного сечения образца (МДж/м²).

В табл. 2.3 приведены значения $a_н$ для распространенных сталей ВСт3сп и ВСт3пс по ГОСТ 380—71.

Таблица 2.4

Классы сталей для строительных конструкций

Класс стали	Механические свойства при растяжении (не ниже)		
	Предел прочности, $\sigma_в$, МПа	Предел текучести $\sigma_т$, МПа	Относительное удлинение δ, %
С 38/23	380	230	25
С 44/29	440	290	21
С 46/33	460	330	21
С 52/40	600	450	16
С 70/60	700	600	12
С 85/75	850	750	10

Примечание. При отсутствии выраженной площадки текучести за предел текучести принимается напряжение, соответствующее остаточному относительному удлинению 0,2% ($\sigma_{0,2}$).

Быстрое охлаждение нагретого образца из стали Ст3 в воде и отпуск увеличивают $\sigma_т$ на 25%, $\sigma_в$ на 20%.

Все стали, применяемые для строительных конструкций на протяжении ряда лет, подразделяются на условные классы прочности (табл. 2.4) в зависимости от их механических свойств при растяжении.

Таблица 2.5

Состав и свойства качественных углеродистых сталей

Марка стали	Содержание углерода, %	Механические свойства		
		Предел прочности $\sigma_в$, МПа	Предел текучести $\sigma_т$, МПа	Относительное удлинение δ_5, %
Сталь 10	0,07...0,14	340	210	31
Сталь 15	0,12...0,19	380	230	27
Сталь 20	0,17...0,24	420	250	25
Сталь 35	0,32...0,40	540	320	20

Важным положительным свойством большинства низкоуглеродистых сталей обыкновенного качества и низколегированных сталей является возможность получения сварных соединений со свойствами, близкими к основному металлу. Это относится к соединениям, сваренным контактной стыковой сваркой, дуговой автоматической в среде защитных газов и под флюсом, электронно-лучевой и т. д. Как правило, наиболее удовлетворительно свариваются стали, содержащие не более 0,25% углерода.

Ниже приводятся примеры некоторых качественных углеродистых конструкционных сталей согласно ГОСТ 1050—74 (табл. 2.5).

Для всех приведенных в таблице сталей содержание кремния равно 0,17. . .0,37%; содержание марганца для стали 35 составляет 0,5. . .0,8%, для остальных — 0,35. . . 0,65%.

Стали с небольшим содержанием углерода обладают высокой пластичностью, а стали с повышенным содержанием углерода — высокой прочностью.

Малоуглеродистые стали даже при небольшом содержании углерода иногда подвергаются термической обработке, например сталь ВСт3сп (ГОСТ 380—71) при содержании С=0,09. . .0,22% Si=0,05. . .0,15%, Mn=0,4. . .0,65% имеет $\sigma_в \geqslant 440$ МПа, $\sigma_т \geqslant 300$ МПа, $\delta \geqslant 16\%$.

§ 2.3. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ СТАЛЕЙ

В последнее время расширяется применение прочных сталей. Повышение прочности достигается введением легирующих добавок и термической обработкой. Легирующие добавки имеют следующие условные обозначения: марга-

Таблица 2.6

Химический состав низколегированных сталей

Марка стали	Содержание элементов, %			
	C	Si	Mn	Прочие
09Г2 14Г2 16ГС 09Г2С 10Г2С1	0,12 0,12...0,18 0,12...0,18 0,12 0,12	0,17...0,37 0,17...0,37 0,40...0,70 0,50...0,80 0,90...1,20	1,4...1,8 1,2...1,6 0,9...1,2 1,3...1,7 1,3...1,65	Cr, Ni, Cu $\leqslant$ 0,3
15ГФ	0,12...0,18	0,17...0,37	0,90...1,2	Cr, Ni, Cu $\leqslant$ 0,3 V = 0,05...0,12
15ХСНД	0,12...0,18	0,40...0,70	0,4...0,7	Cr = 0,6...0,9 Ni = 0,3...0,6 Cu = 0,2...0,4
10ХСНД	0,12	0,80...1,10	0,5...0,8	Cr = 0,6...0,9 Ni = 0,5...0,8 Cu = 0,4...0,6
16Г2АФ	0,14...0,18	0,30...0,60	1,3..,1,7	V = 0,08...0,14 N = 0,0015...0,025 Cr, Ni, Cu $\leqslant$ 0,3

Примечание. Для всех марок сталей содержание S $\leqslant$ 0,004%
P $\leqslant$ 0,035%

нец — Г, кремний — С, никель — Н, хром — Х, молибден — М, ванадий — Ф, алюминий — Ю, медь — Д, титан — Т, азот — А и т. д.

Низколегированные стали выпускают по ГОСТ 19281—73 и 19282—73 (табл. 2.6, 2.7), а также по специальным техническим условиям. Первые две цифры в обозначениях легированной стали указывают на содержание углерода в сотых долях процента, а цифры справа от условного обозначения элемента — среднее содержание легирующего элемента в процентах.

Стали легируют таким образом, чтобы повышение прочности и предела текучести сопровождалось сохранением достаточной пластичности, ударной вязкости, технологической обрабатываемости, свариваемости.

Таблица 2.7

Механические характеристики низколегированных сталей

Марка стали	Толщина проката s, мм	Предел прочности $\sigma_в$, МПа	Предел текучести $\sigma_т$, МПа	Относительное удлинение δ, %	Ударная вязкость МДж/м²	
					при T = 20 °С	при T = −40 °С
09Г2	4...20 21...32	450	310 300	21	— —	0,30 0,40
14Г2	4...10 11...32	470 460	340 330	21	— —	0,35 0,30
16ГС	4...10 23...60	500 470	330 290	21	0,60	0,40 0,30
09Г2С	4...10 33...60	500 460	350 290	21	0,6	0,4 0,35
10Г2С1	4...10 33...60	520 480	380 340	21	0,6	0,4 0,3
15ГФ	4...10 21...32	520 480	380 340	21		0,4 0,3
15ХСНД	4...32	500	350	21	—	0,3
10ХСНД	4...10 40...33	540 520	400	19	—	0,5
16Г2АФ	5...9 33...50	600 580	450 420	20	—	—

Примечания: 1. Стали всех марок должны удовлетворять испытанию на изгиб в холодном состоянии на 180° при $d = 2s$, где d — диаметр оправки, s — толщина проката. 2. Минимальное значение ударной вязкости при T = 20 °С по ГОСТ 9454—78 должно быть не менее 0,3 МДж/м². 3. Для проката из сталей 16ГС, 09Г2С, 10Г2С1 толщиной 11...32 мм и проката из стали 15ГФ толщиной 11...20 мм механические свойства можно определять путем интерполяции.

Присутствие кремния хорошо раскисляет сталь. Марганец устраняет вредное влияние серы, однако при содержании его более 1,5% снижаются пластические свойства металла. Полезно легирование сталей молибденом, хромом, бором. Добавление никеля позволяет повысить хладостойкость стали, но это экономически невыгодно.

Низколегированные стали общего назначения часто поставляются в термически обработанном состоянии. Термическая обработка сталей закалкой — быстрым охлаждением после нагрева до температуры 910 °С — способствует получению мартенситной структуры высокой твердости и малой вязкости. Повышение вязкости достигается последующим отпуском. Нормализация — охлаждение с той же температуры на воздухе — позволяет получить ферритно-перлитную устойчивую структуру.

Из табл. 2.7 видно, что в широком диапазоне толщин ударная вязкость низколегированных сталей общего назначения при температуре — 40 °С оказывается не ниже 0,3 МДж/м².

Применение низколегированных сталей в конструкциях непрерывно расширяется. Для уменьшения массы изделий применяют прочные стали с пределом текучести $\sigma_т$ свыше 350. . .400 МПа и высокопрочные типа 30ХГСНА с $\sigma_в$ до 2000 МПа и $\sigma_т$ до 1570 МПа.

Последние виды сталей обладают высокой прочностью образцов при растяжении, но очень склонны к хрупким разрушениям в результате концентрации напряжений, имеющих место в конструкциях.

Имеются стали, обладающие повышенной прочностью при переменных (циклических) нагружениях, применяющиеся преимущественно в деталях машин.

Выбор марки стали зависит от ряда параметров, главным образом от условий работы конструкции и свариваемости. Как правило, наиболее хорошо свариваются стали, обладающие наименьшим содержанием «эквивалентного» углерода.

Отличительной особенностью медных сплавов является их высокая пластичность, относительное удлинение достигает 65%; $\sigma_т$ для большинства сплавов — 300. . .350 МПа (у бериллиевых бронз $\sigma_т$ после закалки поднимается до 1100. . .1200 МПа).

Большое значение в производстве приобретают стали, обладающие специальными свойствами: повышенной сопротивляемостью коррозии при работе в агрессивных средах, жаропрочностью при работе в условиях высоких температур и т. д.

Теплоустойчивые стали применяют для сварных конструкций, работающих при температурах до 600 °С — паропроводов высокого давления, пароперегревателей и т. д. При эксплуатации конструкций в условиях еще более высоких температур необходимы специальные жаростойкие и коррозионно-стойкие стали.

Широко используются в различных конструкциях нержавеющие стали и другие сплавы. Как правило, предел прочности таких сталей невысок — 500. . .600 МПа, предел текучести — 200. . .300 МПа. Стали обладают высокими пластическими свойствами (относительное удлинение — 20. . .30%). Несмотря на свои высокие пластические свойства, стали и сварные соединения из них чувствительны к концентраторам напряжений в условиях переменных нагрузок. Из сталей этого типа изготовляют конструкции, требующие высоких механических свойств при высоких температурах при работе в коррозионных средах.

При сварке значительного большинства сталей различных марок достигнута возможность получения соединений с хорошими механическими свойствами при работе в условиях низких и высоких температур, при статических, переменных и ударных нагрузках, в тонкостенных и толстостенных изделиях, в различных средах (в атмосфере, под водой, в космосе, при сочетаниях нагрузок и высоких температур и т. д.).

Применение прочных и высокопрочных сталей существенно уменьшает массу конструкций.

Несмотря на высокую стоимость прочного металла по сравнению с низкоуглеродистым, эффективность его применения, безусловно, оказывается рентабельной и не только в денежном отношении, но и в экономии ресурсов.

§ 2.4. ПОВЫШЕНИЕ СВОЙСТВ СТАЛЕЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКОЙ

Большое значение для прочности машиностроительных конструкций имеет поверхностная обработка металлов.

В настоящее время она производится нередко при помощи плазменных методов, а также конденсацией, получаемой из температурной плазмы. При этом используются электронно-лучевые потоки по способу, разработанному в ИЭС им. Е. О. Патона.

С целью улучшения процессов адгезии, вносимых конденсацией, часто используются струи со сверхзвуковой скоростью.

Качество поверхностей улучшается также путем ионного распыления нанесением тончайших слоев с толщиной, определяемой микронами и долями микронов, элементов, не изменяющих химических свойств основного металла, а вместе с тем улучшающих его механические свойства.

Нередко применяется метод модифицирования с изменением химического состава.

Применяется также модифицирование при помощи лазера. Лазерный луч расплавляет тончайший слой поверхности. Остывание поверхности происходит с огромными скоростями — до 10^9 °С/с. Столь интенсивное охлаждение позволяет получить кристаллы со свойствами, недоступными при других видах термической обработки, в частности аморфную.

Помимо свойств, определяющих свариваемость, существенным является возможность получения соединений, надежных в работе. Для разных сталей это условие выполняется не одинаково.

Задачей проектанта является рациональный выбор материала, наиболее хорошо отвечающего конкретным требованиям эксплуатации и простоте выполнения технологического процесса сварки. Чем выше свойства стали, в частности прочность, тем выше должны быть требования, предъявляемые в большинстве случаев к качеству технологического процесса.

§ 2.5. ЦВЕТНЫЕ СПЛАВЫ

В некоторых отраслях промышленности наряду с применением стали получили распространение цветные сплавы: в авиации, судостроении, строительстве. Сплавы на основе алюминия и титана обладают значительно меньшей плотностью по сравнению со сталями, хорошо сохраняют свои свойства при работе в условиях низких температур. Они обладают более высокой коррозионной стойкостью и обеспечивают экономию массы по сравнению с рядом других применяемых материалов. С другой стороны, цветные сплавы имеют в несколько раз меньший, чем сталь, модуль упругости, что снижает устойчивость элементов конструкций, увеличивает их деформируемость.

По сравнению со сталями обыкновенного качества цветные сплавы обладают повышенной чувствительностью к концентраторам напряжений. Это повышает требования к качеству обработки изделий и особенно к качеству сварочных работ.

Таблица 2.8

Механические свойства алюминиевых сплавов

Марка сплава	Свариваемость	Состояние	Механические свойства			Коррозионная стойкость
			$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа	δ, %	
АМц	Высокая	Отожженное	130	50	23	Высокая
АМг1	»	»	110	50	30	Средневысокая
АМг5	»	»	300	150	20	»
АМг6	»	»	340	170	20	»
АМг6	»	Нагартовка 10%	350	250	14	»
АМг6	»	Нагартовка 40%	470	370	6	»
Д16	Низкая	Закаленное и искусственно состаренное	450	400	7	Низкая
ВАД1	Средняя	То же	430	280	18	Средняя
АВ	»	»	330	270	15	»
АД33	»	»	310	250	14	Средневысокая
В92	»	»	440	320	13	Средняя
В95	Низкая	»	520	440	14	Низкая

Примечание. Для всех сплавов $E = 6{,}8 \cdot 10^4 \ldots 7 \cdot 10^4$ МПа, $G = 2{,}6 \cdot 10^4 \ldots 2{,}7 \cdot 10^4$ МПа.

Механические свойства алюминиевых сплавов приведены в табл. 2.8.

Алюминиевые сплавы разделяются на деформируемые и недеформируемые. В сварных конструкциях применяется первый из названных видов, а недеформируемые — литейные сплавы — используются главным образом в отливках.

Алюминиевые сплавы не имеют площадки текучести, предел текучести определяется при остаточной деформации, равной 0,2%. С понижением температуры значения $\sigma_в$, σ_{02} и δ несколько повышаются, поэтому алюминиевые сплавы хорошо работают в этих условиях. С повышением температуры значения $\sigma_в$ и σ_{02} резко снижаются.

Существенным преимуществом алюминиевых сплавов перед стальными является их коррозионная стойкость.

Сплав АМц и группа сплавов системы Al—Mg относятся к деформируемым сплавам, не упрочняемым термической обработкой. Эти сплавы свариваются наиболее хорошо.

Они применяются в мягком отожженном состоянии, а также в слабо и сильно нагартованном, т. е. подвергнутом пластической деформации с целью повышения предела текучести. При нагартовке показатели прочности существенно повышаются (особенно σ_{02}) при некотором снижении относительного удлинения.

Наиболее распространены алюминиевые сплавы, легированные магнием, особенно АМг6, который имеет предел прочности в ненагартованном состоянии около 0,8 от предела прочности Ст3, а $\sigma_{02} \approx 0{,}5\ \sigma_в$ и относительное удлинение $\delta = 18 \ldots 20\%$. Остальные алюминиевые сплавы упрочняются термообработкой.

Сплавы, легированные медью, обладают повышенной прочностью, но плохо свариваются. Их применяют преимущественно в закаленном и искусственно состаренном состояниях. Сплав В92 дуговой сваркой сваривается значительно лучше, чем сплав Д16, но соединения чувствительны к коррозии под напряжением. Сварные соединения сплава Д16 по прочности ниже, чем основной металл, но работают удовлетворительно при повышенных и низких температурах.

Метод порошковой металлургии позволяет получить теплопрочные материалы САП (спеченная алюминиевая пудра), обладающие прочностью до 330 МПа при комнатной температуре и 70. . .80 МПа при температуре 500 °С.

При соответствующей дегазации материалы САП свариваются удовлетворительно.

В сварных конструкциях начали применять титановые сплавы. Они пока дороги, но обладают многими ценными свойствами: малой плотностью (около 4500 кг/м³) и высокими механическими показателями (табл. 2.9).

Близость значений $\sigma_в$ и $\sigma_т$ является причиной повышенной чувствительности к концентраторам напряжений, что отрицательно сказывается на работе конструкций из титановых сплавов. Пределы прочности сварных конструкций составляют 0,8. . .1,0 прочности основного металла.

Конструкции, изготовленные из титана, при относительно малой массе обладают высокой стойкостью против коррозии, хорошими механическими свойствами и красивым внешним видом. Они применяются в химическом машиностроении, в некоторых видах летательных аппаратов, в судостроении, приборостроении, а также при возведении монументов.

Магниевые сплавы обладают малой плотностью и невысокими прочностными характеристиками. Разработаны методы их сварки различными способами.

Таблица 2.9

Химический состав и механические свойства сплавов титана

Сплав	Содержание алюминия в сплаве, %	Состояние	Механические свойства		
			$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа	δ_{10}, %
ОТ4	3,5...5,0	Отожженное	700...900	550...650	12...20
ВТ5	4,3...6,2	»	700...950	660...850	10...15
ВТ5-1	4,0...6,0	»	750...950	650...850	10...15
ВТ20	5,5...7,0	»	950...1150	850...1000	8
ВТ6	5,3...6,8	Закаленное и состаренное	1100...1150	1000...1050	14...16
ВТ14	3,5...6,0	То же	1150...1400	1080...1360	6...10

Примечание. Сплав ВТ6 содержит 3,5...6,3% ванадия, а сплав ВТ14 содержит 0,8...1,9% ванадия и 2,5...3,8% молибдена. Модуль упругости титанового сплава $E = 1{,}1 \cdot 10^5$ МПа.

Медные сплавы обладают высокой плотностью, хорошей электропроводностью и свариваются различными способами.

Деформируемые оловянистые бронзы имеют $\sigma_т = 350. . . 400$ МПа, относительное удлинение $\delta_{10} = 50\%$, хорошо паяются. Также хорошо паяются и латунные сплавы (медь + цинк) $\sigma_в = 260. . .450$ МПа, относительное удлинение большинства латуней $\delta_{10} = 50\%$.

Ряд ценных свойств имеют сплавы на основе бериллия. Они обладают высокой прочностью, пластичностью, высоким модулем упругости, но используются крайне редко ввиду высокой стоимости и сложностью их обработки. Бериллиевые сплавы очень токсичны и без применения особых мер предосторожности могут принести большой вред здоровью человека.

§ 2.6. КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ СТАЛЕЙ И ЦВЕТНЫХ СПЛАВОВ

При проектировании конструкций необходимо учитывать коррозионную стойкость материалов в зависимости от свойств среды.

Агрессивными средами являются: углекислый газ, аммиак, сероводород и другие газы; более слабыми — влажность внутри помещений и на открытом воздухе, действие

аэрозолей в пыли, содержащих хлориды, сульфиды, фосфаты.

Повышенной коррозионной стойкостью обладают низколегированные стали 10ХСНД, 15ХСНД. Другие низколегированные стали — 18Гпс, 14Г2АФ, 09Г2С — аналогично углеродистым сталям класса ВСт3 при наличии агрессивного воздействия среды нуждаются в антикоррозионной защите.

Стали приобретают под действием активных агентов водородное охрупчивание, а некоторые высокопрочные стали охрупчиваются даже при атмосферной агрессии.

Переменные по величине напряжения усиливают коррозионное воздействие. Влияние силовых воздействий на коррозию усиливается в высокопрочных сталях по сравнению со сталями обыкновенного качества. В результате коррозии нередко образуется не только потеря в массе металла, но и коррозионное растрескивание конструкций, особенно в щелочных средах при температуре свыше 40. . .50 °С.

Системы Al—Mg обладают наиболее высоким сопротивлением коррозии по сравнению с другими алюминиевыми сплавами.

Высокопрочные алюминиевые сплавы системы Al—Zn—Mg подвергаются расслаивающей коррозии.

Против коррозии конструкций применяют металлические покрытия: горячее цинкование или алюминирование путем погружения объекта в расплавленный металл. Толщина покрытия составляет 60. . .200 мкм.

Металлизация — нанесение напыленного наплавленного металла заданного состава на очищенную от окислов поверхность.

Защита от коррозии стальных конструкций производится также с помощью лакокрасочных материалов, наносимых распылением или струей и состоящих из грунтового и покрывных слоев.

Защита алюминиевых конструкций производится электрохимическим путем — анодированием на толщину 8. . . 20 мкм, а также оксидными пленками, получаемыми погружением объектов в растворы хроматов щелочных металлов.

§ 2.7. СВЕРХПЛАСТИЧНЫЕ СПЛАВЫ

При особых условиях многие сплавы обладают сверхпластичностью *, которая представляет собой аномально высокое удлинение материала. Оно наблюдается преимущество при ультрамикроскопическом размере зерен (1. . . 10 мкм). Сверхпластичность достигается деформированием при температуре около 0,4 $T_{пл}$.

Основные признаки сверхпластичного течения — существенное увеличение деформативности, удлинение при разрыве, достигающее сотен, а в некоторых случаях превышающее тысячу процентов, заметное снижение сопротивляемости деформированию в пластической зоне и очень резкая зависимость характера текучести от скорости деформации, которую варьируют с относительной деформацией 0,1. . .0,0001 в секунду. Эффект сверхпластичности существенно зависит от скорости деформирования металла и резко повышается с ее уменьшением. Например, алюминиевые сплавы при уменьшении скорости деформирования в 16 раз способны увеличить пластическое деформирование в восемь раз.

Свойства сверхпластичности зависят также от температуры, при которой происходит деформирование, от структуры сплава, создаваемой направлением прокатки. Упорядочение направленности зерен повышает сверхпластичность. Последнее зависит от характера границ зерен (эффекта зернограничного проскальзывания); движения дислокаций; массопереноса путем диффузии и т. д.

Важным условием получения сверхпластичности является наличие мелкозернистой структуры. Промышленным путем измельчение структуры достигается металлургическими процессами за счет введения в состав сплава химических элементов, оказывающих влияние на процесс кристаллизации; применением рекристаллизационного отпуска, термоциклированием, термомеханическими операциями, использованием методов порошковой металлургии и т. д.

Наиболее эффективные результаты в области сверхпластичности имеются в области титановых сплавов, например титановый сплав ($\alpha+\beta$) при сверхпластичности достигает удлинения сотни процентов от своих первоначальных размеров при T=900. . .1000 °С.

Сплав сохраняет высокие механические свойства после остывания в условиях обычных температур:

$$\sigma_в = 1350 \ldots 1500 \text{ МПа}, \quad \sigma_т = 1200 \ldots 1400 \text{ МПа},$$
$$\delta_5 = 5 \ldots 8\ \%, \quad a_н = 0{,}26 \ldots 0{,}29 \text{ кДж/м}^2.$$

Алюминиевые и магниевые сплавы также позволяют получить эффективные результаты в деформировании за

* Сверхпластичность впервые была обнаружена А. А. Бочваром.

счет сверхпластичности. Некоторые из этих сплавов при T=420 °С деформировались на величину ε=400%.

Менее эффективно получение сверхпластичного удлинения в жаропрочных сплавах или низколегированных сталях. Никелевый сплав НП2 при T=800 °С доводится до удлинения 180%. Сталь 15ХСНД при T=800 °С можно удлинить на 150%.

Все приведенные данные убедительно показывают эффективность использования свойств сверхпластичности материалов конструкций, в частности с целью последующей обработки их штамповкой со сложной конфигурацией.

Нет сомнений, что ряд сплавов, подвергнутых сверхпластичному деформированию, можно соединять методами сварки: диффузионной, холодной, а также пайкой.

§ 2.8. ПЛАСТМАССЫ

В настоящее время в промышленности широко применяются пластмассы — полимеры с заполнением.

Термопластичные полимеры (термопласты) — высокомолекулярные материалы, которые при нагреве до некоторой температуры переходят в вязкотекучее состояние, а при последующем охлаждении возвращаются в исходное. Эти материалы хорошо соединяются сваркой. К таким материалам относятся: полистирол, полиметилметакрилат, полиэтилен и многие другие. В сварных конструкциях целесообразно применять винипласт и полистирол, которые обладают относительно высокой прочностью, легко обрабатываются и свариваются, хотя и имеют несколько повышенную чувствительность к надрезу.

Механические свойства полимеров разнообразны, нередко достаточно высоки. Полимеры склонны к старению — ухудшению физико-механических свойств с течением времени.

В состав полимеров вводят в качестве наполнителей пластификаторы для повышения пластических свойств, добавки для уменьшения горючести, красители, отвердители и др. Плотность массы полимеров очень мала (1. . . 2 г/см^3); коэффициент теплового расширения во много раз больше, чем у сталей, химическая и электроизоляционная стойкости высоки. Механические свойства повышаются при использовании в качестве наполнителя стеклянного волокна.

При нагреве прочность полимеров понижается. Поливинилхлорид, полистирол используют при температуре ниже

Таблица 2.10

Свойства термопластичных пластмасс

Материал	$\sigma_в$, МПа	δ, %	Максимальная температура эксплуатации без нагружения
Полипропилен	26...38	700...800	100
Полистирол	40...60	4...3	50...70
Поливинилхлорид жесткий	50...65	50...350	50...55
Капрон сухой	75...85	50...130	80...100
Капрон, насыщенный водой	35...50	160...250	—

50 °С. При температуре ниже 25 °С прочность указанных полимеров повышается, но одновременно растет и хрупкость материала.

Большинство пластмасс не реагируют с водой.

Следует учитывать, что полимеры огнеопасны, особенно полистирол, горючесть которого уменьшают введением специальных добавок.

В качестве заменителей металлов в производстве начали широко применять полимеры: в подшипниках, транспортных конструкциях, при сооружении резервуаров, трубопроводов, приборов в судовых объектах, в отделочных конструкциях и т. д. Из полимеров изготовляют пленки, волокна.

Термопласты, свойства которых приведены в табл. 2.10, переходят при высоком нагреве в вязкопластичное состояние и хорошо свариваются. Стеклообразные термопласты при растяжении очень сильно вытягиваются, остаточные деформации при разрыве достигают сотен процентов. При

Таблица 2.11

Свойства термореактивных пластмасс

Материал	$\sigma_в$, МПа	δ, %	Максимальная температура эксплуатации без нагружения
Полистирол без наполнителей	15...70	1...10	95...200
Порошковые пластмассы	30...60	1...3	100...200
Стеклотекстолит	200...600	1...3	200...400
Текстолиты	65...100	1...3	95...105

растяжении шейка постепенно распространяется по всей длине образца.

Термореактивные пластмассы (табл. 2.11) в вязкотекучем состоянии при нагреве не обращаются, а хрупко разрушаются.

В полимеры добавляют наполнители в количестве 40. . . 70% по массе для повышения механических свойств, снижения себестоимости и изменения других параметров.

§ 2.9. КОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В последние годы получили развитие конструкции из составных композитных материалов, представляющих компактную массу с разнородными составляющими, в частности с вкрапливанием в матрицу высокопрочных и тугоплавких составляющих. Разрабатываются методы сварки композитных материалов.

По удельным значениям прочности, жесткости при высокой температуре, сопротивлению, усталостному разрушению и другим свойствам композитные материалы нередко превосходят конструкционные сплавы. Материалу придают форму запроектированных готовых объектов.

К о м п о з и т ы — это материалы, которые состоят из отдельных нерастворимых компонентов. Элементарным примером композитного материала является железобетон. *Железобетон* — это бетон, обволакивающий стальную арматуру.

Основой композитных материалов (матрицей) служат сплавы, полимеры, керамические материалы.

Матрица придает форму материалу. В ней расположены наполнители, которые часто называют упрочнителями.

По форме армирования наполнители разделяют на двумерные, имеющие два соизмеримых с объектом размера; одномерные, имеющие один соизмеримый с объектом размер (волокна); нуль-мерные, имеющие малые размеры по всем трем осям координат (дисперсное упрочнение). По схеме армирования наполнители делятся на одноосные, двух- и трехосные.

В нуль-мерных формах наполнителями часто служат частицы тугоплавких оксидов, карбидов, боридов.

Дисперсно-упрочненные материалы получают методами порошковой металлургии. К ним относится спеченный из алюминиевой пудры материал (САП) с частицами, размеры которых не превышают 1 мкм.

Таблица 2.12

Механические свойства одноосно-армированных материалов алюминия

Наполнитель		$\sigma_в$, МПа
Материал	Кол-во, %	
Борное волокно	50	2400
Углеродное волокно	30...40	2700
Стальная проволока	40	1200

С увеличением содержания дисперсных включений повышается твердость и прочность материала. Из САП1, САП2 и т. д. готовят полуфабрикаты, листы, профили для работ в изделиях при T=30. . .500 °С.

Применяются дисперсно-упрочненные сплавы на никелевой основе, упрочнителями которых служат частицы оксидов тория, гафния и др.

Очень часто упрочнителями служат волокна из нитевидных кристаллов чистых элементов или тугоплавких соединений. В качестве матрицы используют также полимеры и керамику. Указанные композиты обладают более высокими прочностными свойствами, чем полимеры.

С повышением модуля упругости волокон повышается воспринимаемая ими нагрузка. В табл. 2.12 приведены механические свойства одноосно-армированных материалов.

Связь между компонентами в композитах на металлической основе обеспечивается адгезией.

Физические и механические свойства волокон, вводимых в матрицу, приведены в табл. 2.13.

Тончайшие волокна обладают колоссальными $\sigma_в$ и $\sigma_т$. Свойства волокон зависят от исходного сырья и обработки. Крайне полезно включать их упрочнителями в матрицы полимеров.

Адгезия между матрицей и упрочнителем удовлетворительная. Созданы порошковые материалы, из которых легко выполняются изделия любой формы. Порошковые материалы получают спеканием, прессованием. Многие порошковые материалы имеют хорошие механические свойства и могут свариваться.

В деталях, работающих при высоких температурах, например в двигателях внутреннего сгорания, применяют керамику.

Таблица 2.13

Физические и механические свойства волокон, вводимых в матрицу

Материал	$T_{пл}$, °С	$\sigma_в$, МПа	E, МПа
Углерод	3650	1700	$674 \cdot 10^3$
Бор на вольфрамовой проволоке	2300	2707	$(373...402)\,10^3$
Вольфрам	3410	1650...3200	$420 \cdot 10^3$

В несколько раз повышают прочность алюминиевой матрицы борные и углеродистые волокна при наполнении до 50%.

Керамика из окислов Al_2O_3, MgO и ZrO_2 отличается очень высокой прочностью при сжатии: при комнатных температурах — до 3000 МПа, при T=110 °С — 900 МПа.

Керамика из Al_2O_3 успешно используется при изготовлении резцов, фильтров, для протяжки проволок в деталях машиностроения. Также применяют фосфор кварцево-полевошпатовый и другие материалы с $\sigma_и$=90...110 МПа.

Изготовляют ситаллы методом спекания порошков с последующим формообразованием направленной кристаллизации и последующей механической обработкой. Наиболее перспективны износо- и химико-устойчивые ситаллы.

Керамика и ситаллы соединяются клеями преимущественно на эпоксидной основе, хорошо паяются, обеспечивают прочные соединения в результате диффузионной сварки.

§ 2.10. СОРТАМЕНТ

В сварных конструкциях применяют металл в виде проката, отливок, поковок и штампованных изделий. Наиболее часто сварные конструкции изготовляют из проката.

Листовой прокат. Листовую сталь получают прокаткой между валками без бокового давления. Сортамент на толстую листовую сталь включает листы толщиной 4... 160 мм. Листовой прокат приобретает все большее значение в промышленности. Стоимость проката зависит от его сорта и размеров. Наименьшую стоимость имеют профили типовых размеров.

Простой сортовой прокат. К нему относят круглую, шестигранную и полосовую сталь. Круглая сталь (ГОСТ 2590—71) широко используется в качестве арматуры железобетонных сооружений, а также в строительных конструкциях, работающих под небольшими нагрузками, например в фермах легкого типа.

Фасонные профили общего назначения. Если элемент конструкции подвергается изгибу, то рациональность профиля с позиции минимальной массы при заданной несущей способности определяется отношением W/A, где W — момент сопротивления изгибу; A — площадь поперечного сечения. Чем больше отношение W/A, тем эффективнее используется профильный прокат.

Двутавровые балки (двутавры) — профильные элементы с большими моментами инерции при относительно небольших площадях поперечного сечения. Номер двутавра указывает его высоту в сантиметрах. Начиная с № 18 и и выше двутавры прокатываются с различной площадью поперечного сечения при одной и той же высоте профиля (ГОСТ 8239—72).

Более экономичны двутавры с параллельными гранями полок (так называемые широкополочные двутавры), широко применяемые за рубежом, а также тавровые профили. С пуском нового универсального балочного стана в Нижнем Тагиле (1978) такие двутавры выпускаются в СССР по ТУ 14-2-24—72. Двутавры применяют в различных строительных и машиностроительных конструкциях.

Угловая сталь (уголки) состоят из двух полок равной или неравной ширины. Сортамент угловой стали определяют по ГОСТ 8509—86.

Швеллеры используют при конструировании станин, рам, элементов ферм и других видов конструкций. Сортамент швеллеров определяет ГОСТ 8240—72.

Фасонные профили отраслевого назначения применяют в различных областях народного хозяйства: для изготовления рельсов, железнодорожного транспорта, тавровых и зетовых элементов строительных конструкций и т. д. Сортамент фасонных прокатных профилей весьма разнообразен (рис. 2.3). Он включает периодические, штампованные, гнутые, прессованные и трубчатые профили.

Периодические профили (профили переменного сечения) целесообразно применять для изготовления арматуры железобетона. Винтообразная форма стержня увеличивает его поверхность и улучшает сцепление металла с бетоном. Применение периодического проката в машиностроении выгод-

нее, чем обычного, так как позволяет уменьшить массу конструкций.

Одной из современных тенденций, направленных в сторону сбережения ресурсов, является применение тонкостенных фасонных профилей, полученных различными технологическими приемами, в частности гофрированных преимущественно для объектов строительства.

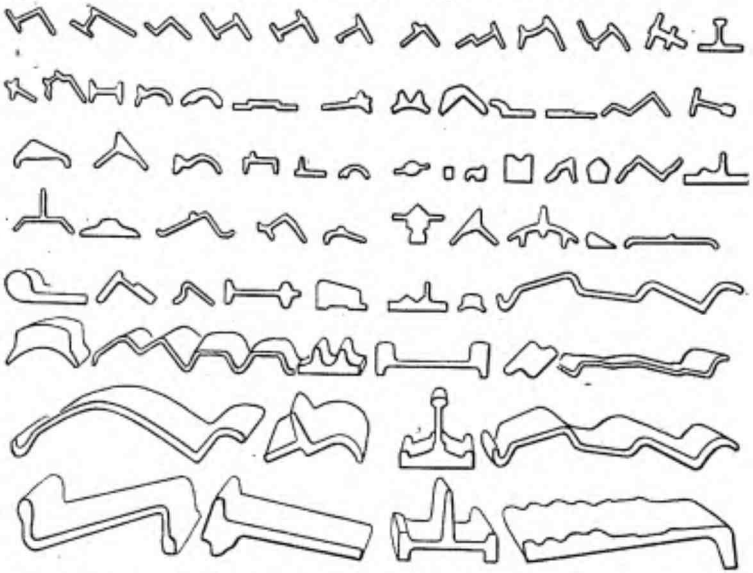


Рис. 2.3. Фасонные профили проката отраслевого назначения

Штампованные профили толщиной 5. . .6 мм получают из листовой стали холодной штамповкой. Особенность этих профилей — большой момент инерции при относительно малых площадях поперечного сечения, а следовательно, и при малой массе. Размеры штампованных элементов зависят от конструкции прессов. Имеются прессы, которые позволяют обрабатывать элементы длиной до 5. . .6 м. Штампованные элементы находят широкое применение в авиастроении, автомобилестроении, промышленном строительстве. Штампуются ребристые плиты, обеспечивающие прочность и жесткость.

Гнутые профили изготовляются из горячекатаной и холоднокатаной отожженной листовой ленточной и полосовой стали обыкновенного качества и из низколегированной стали преимущественно малых толщин (3. . .4 мм). В зоне загибов имеют место пластические деформации, и

поэтому не следует допускать наложения в них швов, так как металл будет подвергаться старению.

Разработаны типы гнутых уголков, специальные корытообразные профили, неравнобокие, С-образные и многие

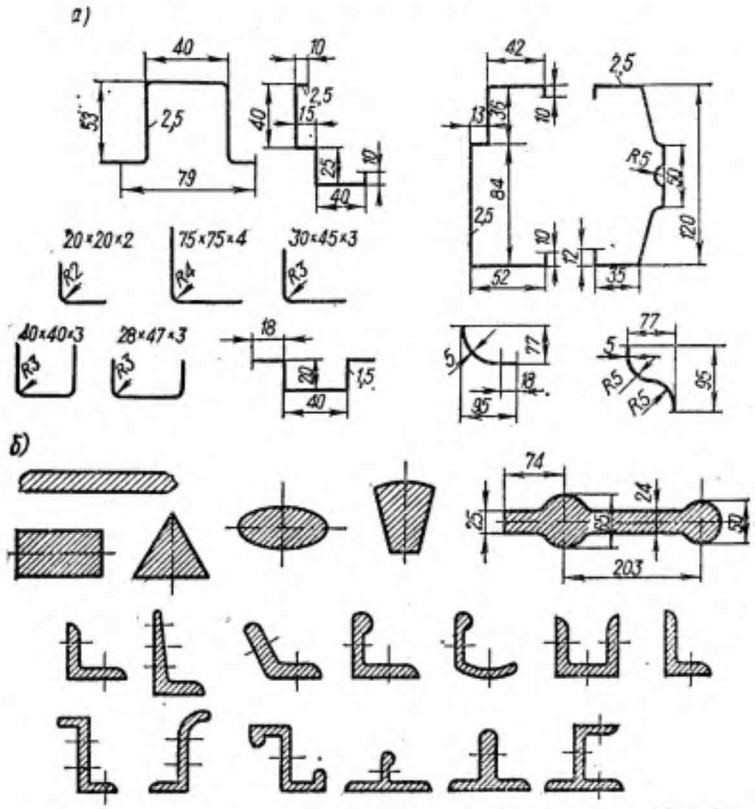


Рис. 2.4. Примеры гнутых (*а*) и прессованных (*б*) профилей

другие, которые применяются в тонкостенных конструкциях. Гнутые профили экономичны, так как при относительно малой площади поперечного сечения и малой массе они обладают повышенной жесткостью, что является существенно важным при работе элемента на изгиб, продольное сжатие и кручение.

Прессованные профили изготовляют из алюминиевых сплавов. Им можно придавать разнообразные виды (открытые, трубчатые). Примеры гнутых и прессованных профилей приведены на рис. 2.4, *а*, *б*.

Трубчатые профили различных очертаний постоянного или переменного поперечного сечения изготовляют сваркой, горячей прокаткой, прессованием, горячим и холодным волочением и раздувкой. Помимо круглого профиля, наиболее распространенного в промышленности, изготовляют также фасонные трубы (рис. 2.5).

Трубы выпускают с широким диапазоном диаметров и толщин стенок. Их используют при монтаже трубопроводов, а также при изготовлении решетчатых конструкций

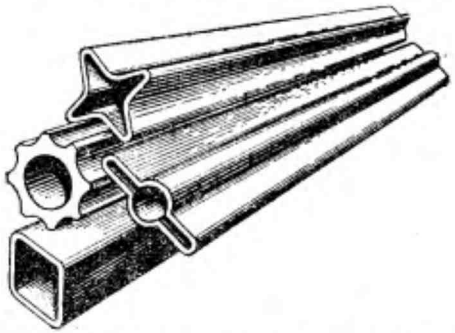


Рис. 2.5. Трубчатые фасонные профили

типа вышек, мачт, башен. При проектировании следует учитывать, что стоимость одной тонны труб выше, чем стоимость сортового проката, а трубы малого диаметра дороже, чем большого.

Трубчатые элементы заполняются в некоторых случаях инородными материалами. Типичными представителями являются трубы, заполненные бетоном. Из сталебетонных труб воздвигаются строительные объекты, например железобетонные мосты. С заполнителями разного назначения изготовляются панели строительных конструкций, не проводящие тепла, звука и т. д.

§ 2.11. ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Наиболее распространенным примером централизованного изготовления сварных элементов являются производство двутавров. Прокатка двутавров при многосерийном изготовлении производительнее сварочного процесса. Сварка дает большую возможность варьировать форму поперечных секций и поэтому является экономичнее с позиции экономии массы металла. Рентабельность того или другого производства находится экономическим расчетом.

Сварка допускает возможность изменения по длине размеров не только поперечных сечений поясов, но и размеров катетов поясных швов. Все это допустимо лишь при централизованном автоматизированном производстве, исключающем элементы субъективизма.

Одна из первых линий по механизированному производству сварных двутавровых балок была построена на заводе им. Бабушкина в г. Днепропетровске. В настоящее время на ряде предприятий применяется этот метод производства.

То же самое имеет место при сопоставлении изготовления корпусов подшипников методом сварки или литьем.

При мелкосерийном производстве и сложных конструктивных формах рентабельность на стороне сварочных процессов, при крупносерийном и простых формах — на стороне литейных процессов.

С укрупнением и централизацией производственных баз рентабельность применения сварных конструкций по сравнению с прокатом, литьем, ковкой повышается. Рациональность замены сварными конструкциями литых и кованых решается глубоким технико-экономическим анализом.

Контрольные вопросы к главе 2

1. Какие добавки содержат углеродистые стали?
2. Какое влияние оказывает содержание углерода в стали на ее прочность и пластические свойства?
3. Какие основные механические свойства стали Ст3?
4. Как изменяются свойства стали Ст3 при термообработке?
5. Каковы механические свойства малоуглеродистых сталей и как они меняются при термообработке?
6. Каковы механические свойства низколегированных сталей?
7. Какие требования будут предъявляться к сталям в будущем?
8. В чем отличие физических и механических свойств цветных сплавов от сталей?
9. Характеристика полимеров.
10. Характеристика керамики, требования в будущем.
11. Характеристика композитов.
12. Какие требования будут предъявляться к неметаллическим материалам будущего?

ГЛАВА 3

СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ И РАСЧЕТ ИХ СТАТИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ

§ 3.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ВИДОВ СВАРКИ

Сварка представляет собой процесс неразъемного соединения, создаваемого приложением химической, электрической, механической энергий или их комбинации в локальной зоне.

Соединения оформляются при концентрациях энергии, варьируемых в широком диапазоне при разных коэффициентах полезного действия.

Таблица 3.1

Параметры сварочных процессов в функции концентрации энергии, приложенной к единице площади

Способ сварки	Концентрация энергии, Вт/см²
Газовая	$6 \cdot 10^2$
Дуговая	$4 \cdot 10^4$
Плазменная	10^5
Электронно-лучевая	$10^8 \ldots 10^9$
Лазерная	$10^9 \ldots 10^{10}$

В табл. 3.1 приведены параметры, характеризующие разновидности сварочных процессов.

В данной таблице приведены средние цифры, характеризующие процесс.

В соответствии с различием в концентрации энергии различаются способы оформления соединений для сварки, их свойства, энергоемкость производства работ и др.

Основным видом сварки сталей и сплавов толщиной 2. . . 50 мм является дуговая сварка металлическим электродом автоматическая, полуавтоматическая и ручная.

Автоматическую сварку под флюсом применяют при укладке швов на горизонтальной плоскости, в среде защитных газов во всех пространственных положениях как автоматами и полуавтоматами, так и вручную.

Исключительно высокой производительностью обладает сварка токами высокой частоты.

Электрошлаковая бездуговая сварка рекомендуется для соединений элементов толщиной свыше 40. . .50 мм. На ее основе разработаны новые металлургические процессы электрошлакового переплава и электроотливки.

Контактную стыковую сварку применяют для соединений встык деталей различного профиля преимущественно в серийном производстве.

Контактная точечная сварка применяется для соединения тонкостенных элементов из сталей и цветных сплавов, а также металлоконструкций арматуры железобетона. Существующие контактные машины позволяют сваривать пакеты стальных листов суммарной толщиной в несколько десятков миллиметров.

Контактная роликовая сварка применяется для соединения тонкостенных элементов.

Диффузионной сваркой в вакууме соединяют однородные и разнородные металлы, а также металлы с неметаллами.

Производительна пайка для соединений сталей, в частности оцинкованных деталей, а также графита и других разнородных материалов.

Ультразвуковая сварка целесообразна для соединения пластмасс.

Сварка с интенсивными энергиями, электронным лучом и лазером обладает высокой производительностью и вызывает минимальные изменения размеров деталей.

Комплексная механизация и автоматизация выдвигает требования создания типизированных конструкций для изготовления на поточных линиях.

§ 3.2. ПРИНЦИП РАСЧЕТА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПО ПРЕДЕЛЬНЫМ СОСТОЯНИЯМ И ДОПУСКАЕМЫМ НАПРЯЖЕНИЯМ

Согласно СНиП II-23—81, оценка несущей способности строительных конструкций и соединений производится по предельным состояниям.

Строительные конструкции следует рассчитывать на силовые воздействия, при которых они перестают удовлетворять заданным эксплуатационным требованиям.

Предельные состояния подразделяются на две группы.

К первой группе, соответствующей потере несущей способности или непригодности к эксплуатации, относятся: общая потеря устойчивости формы; потеря устойчивости положения; хрупкое, вязкое, усталостное или иного характера разрушение; разрушение под совместным воздействием силовых факторов и неблагоприятного влияния внешней среды; качественное изменение конфигура-

ции; резонансные колебания; состояния, при которых возникает необходимость прекращения эксплуатации в результате текучести материала, сдвигов в соединениях; ползучести и чрезмерного раскрытия трещин.

К второй группе относятся: предельные состояния, затрудняющие нормальную эксплуатацию конструкций или снижающие долговечность их вследствие появления недопустимых перемещений (прогибов, осадок, углов поворота), колебаний, трещин и т. д.

В строительных организациях в основу расчета по методу предельного состояния положены так называемые расчетные сопротивления R, значения которых равны отношению предела текучести $\sigma_т$ к коэффициенту надежности $k_н$.

Для низкоуглеродистых сталей номинальное сопротивление R составляет примерно 0,9 $\sigma_т$.

При расчете по этому методу находят величину допускаемых усилий в элементах. Допускаемые усилия определяют с учетом коэффициента надежности $k_н$ и коэффициента условий работы m, учитывающих специфический характер работы конкретных объектов рассматриваемой области техники. Коэффициенты $k_н$ и m определяют для стропильных ферм зданий, резервуаров, трубопроводов и т. п. на основе всестороннего изучения работы конструкции.

Допускаемые усилия для элемента при продольной силе определяют по формуле

$$N_{доп} \leqslant RmA/k_н, \qquad (3.1)$$

где A — площадь поперечного сечения.

Расчетное усилие N должно быть меньше или равно $N_{доп}$.

Аналогичным путем находят допускаемый момент при изгибе:

$$M_{доп} = RmW/k_н, \qquad (3.2)$$

где W — момент сопротивления сечения.

Из формул (3.1) и (3.2) видно, что величина $Rm/k_н$ представляет собой, по существу, допускаемое напряжение. Коэффициенты m и $k_н$ неодинаковы не только для разных изделий, но в некоторых случаях и для элементов одной конструкции. Таким образом, по этому способу для разных конструкций расчет производится по различным допускаемым напряжениям.

Коэффициенты условий работы некоторых элементов, согласно СНиПу, имеют следующие значения: для балок и сжатых элементов ферм, перекрытий m=0,9 для сжатых

Таблица 3.2

Расчетные сопротивления сталей (листового проката)

Марка стали	Толщина металла s, мм	Расчетное сопротивление по пределу текучести $R_т$, МПа	Расчетное сопротивление по пределу прочности $R_п$, МПа
ВСт3кп2-1	4...10	220	345
ВСт3кп2-1	11...20	210	335
ВСт3сп5-1	4...10	270	370
ВСт3сп5-2	10...20	260	360
09Г2	11...20	300	430
09Г2С	11...20	315	460
15ХСНД	4...32	330	465
10ХСНД	4...32	355	480
18Г2АФпр	4...32	400	535

основных элементов (кроме опорных) решетчатых ферм при их гибкости $\lambda \geqslant 60$, m=0,8; для сжатых раскосов пространственных решетчатых конструкций из одиночных уголков плоских ферм m=0,75 для колонн жилых и общественных зданий, а также в подкрановых балках для кранов грузоподъемностью более 5 т m=0,9.

Расчетные сопротивления R для основного металла приведены в табл. 3.2, которые составляют приблизительно 0,95 от нормального значения предела текучести $\sigma_т$.

Для указанных марок сталей предназначены разные марки электродной проволоки и флюсов при автоматической сварке, а также электродов — при ручной.

Для сварных стыковых соединений, работающих при напряжениях изгиба, растяжения, сжатия, в случае применения автоматической, полуавтоматической или ручной сварки с последующим контролем швов физическими методами расчетные сопротивления принимаются равными расчетным сопротивлениям основного металла конструкции по пределу прочности и соответственно по пределу текучести.

При отсутствии физических методов контроля расчетные сопротивления принимаются равными 0,85 от предела текучести $\sigma_т$.

При сдвиге в стыковых соединениях расчетные сопротивления в швах равны сопротивлениям на сдвиг в основном металле.

Для сварных угловых швов по металлу расчетное сопротивление составляет 0,55 от расчетного сопротивления по

пределу прочности, по границе сплавления — 0,45 от расчетного сопротивления.

В основу расчета машиностроительных конструкций и соединений положены допускаемые напряжения, которые устанавливаются в зависимости:

от свойств материалов (при улучшении механических свойств допускаемые напряжения повышаются);

от степени точности расчета прочности (чем точнее производится расчет прочности и полнее учитываются нагрузки, действующие на конструкцию, тем меньше принимаемый коэффициент запаса прочности, а следовательно, выше допускаемое напряжение);

от рода усилий (растяжение, сжатие, изгиб, срез);

от качества технологического процесса (особенно при установлении допускаемых напряжений в сварных соединениях);

от характера нагрузок (при переменных нагрузках допускаемое напряжение понижается по сравнению со статическими).

Допускаемое напряжение — это фактор технико-экономический.

Если напряжения в конструкции существенно занижены относительно допускаемых $\sigma<0{,}95\,[\sigma]_р$ и нет убедительных мотивов подобного занижения (требования жесткости, устойчивости и т. д.), то спроектированная таким путем конструкция имеет излишнюю несущую способность, а следовательно, излишнюю массу материала и неэкономична.

Если, напротив, напряжения в конструкции $\sigma>1{,}05\,[\sigma]_р$, то это означает, что несущая способность спроектированной конструкции менее требуемой. При отсутствии особых обстоятельств (временный характер эксплуатации и др.) конструкцию следует признать неполноценной с позиции надежности.

Наиболее желательным является случай, при котором $\sigma=[\sigma]_р$. Это условие обеспечивает экономичность и требуемую прочность.

Допускаемые напряжения при растяжении $[\sigma]_р$ обычно называют основными. Допускаемые напряжения при других видах усилий определяют как производные от $[\sigma]_р$.

В машиностроении в конструкциях, работающих под статическими нагрузками, в большинстве случаев допускаемые напряжения назначаются в зависимости от предела текучести $\sigma_т$ и определяются отношением $[\sigma]_р=\sigma_т/k_1$ ($k_1=1{,}3\ldots1{,}5$); в более редких случаях — в зависимости от предела прочности — $\sigma_в$: $[\sigma]_р=\sigma_в/k_2$ ($k_2=2{,}0\ldots2{,}4$).

Допускаемые напряжения при переменных нагрузках будут рассмотрены в гл. 5.

При сжатии коротких элементов, в которых продольный изгиб не может иметь места, допускаемое напряжение $[\sigma]_{сж}$ принимается равным $[\sigma]_р$. При сжатии длинных элементов $[\sigma]_{сж}$ принимается равным $[\sigma]_р\varphi$, где φ — коэффициент продольного изгиба, зависящий от гибкости сжатого элемента, а также от предела текучести.

Для стальных конструкций допускаемые напряжения на изгиб $[\sigma]_и$ принимаются равными $[\sigma]_р$. При срезе допускаемое напряжение изменяется в зависимости, согласно положенной в расчет теории прочности. Обычно допускаемое напряжение на срез определяется из соотношения $[\tau]=(0{,}5\ldots0{,}6)[\sigma]_р$. В других случаях — в зависимости от предела прочности $\sigma_в$.

Допускаемые напряжения в швах машиностроительных конструкций устанавливаются в зависимости от допускаемых напряжений основного металла с учетом надлежащего подбора присадочного материала — электродов, электронной проволоки, флюсов. Это положение позволяет проектировать сварные соединения, равнопрочные основному металлу, не производя определения величины усилий, действующих на них; кроме того, при конструировании соединений в этом случае нет необходимости учитывать многие переменные величины, влияющие на выбор коэффициентов запаса прочности разрабатываемой конструкции (степень точности расчета и т. п.).

С технологической стороны способ установления допускаемых напряжений в сварных соединениях вполне оправдан. При сварке автоматом под флюсом или в среде защитных газов, а также контактным способом механические свойства швов зависят в значительной степени от механических свойств основного металла и электродного, подбираемого к основному.

Прочность углового шва по наименьшему его поперечному сечению на срез составляет 0,6. . .0,65 от допускаемого напряжения на листовой детали $[\sigma]_р$.

Наиболее существенными факторами, влияющими на механические свойства соединений и швов, а также на значения допускаемых напряжений в них, являются качество выполнения и вид технологического процесса сварки.

Сварные соединений сталей, выполненные дуговой сваркой, по определению допускаемых напряжений делятся на две группы.

К первой группе относятся швы низкоуглеро-

дистых сталей обыкновенного качества и низколегированных, у которых механические свойства швов и зоны термического влияния соответствуют свойствам основного металла. Рекомендуемые допускаемые напряжения для швов этой группы приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Допускаемые напряжения для швов соединений низкоуглеродистых сталей обыкновенного качества и низколегированных

Род усилия	Тип шва	Технологический процесс сварки	Допускаемое напряжение
Растяжение — сжатие	Стыковой	Дуговая, автоматическая и полуавтоматическая под флюсом, в CO_2	$[\sigma]_р$
То же	»	Дуговая электродами Э42А; Э46А, Э50А	»
»	»	Контактная	»
»	»	Электронно-лучевая	»
»	»	Диффузионная	»
Срез	Угловой	Дуговая, автоматическая: полуавтоматическая под флюсом, в CO_2	$0{,}65\,[\sigma]_р$
»	Стыковой	То же	»

Примечание. В строительных конструкциях допускаемые напряжения на угловые швы принимаются повышенными относительно указанных традиционных.

Ко второй группе относят швы сталей со специальными свойствами: высокопрочные, коррозионно-устойчивые и т. д., у которых свойства швов или металла околошовной зоны ниже свойств основного металла.

При сварке низкоуглеродистых сталей марки Ст3, для которой допускаемое напряжение $[\sigma]_р = 160$ МПа, допускаемые напряжения в швах, выполненных автоматической сваркой или ручной электродами Э42А, будут следующие: $[\sigma']_р = 160$ МПа, $[\sigma']_{сж} = 160$ МПа (без учета жесткости), $[\tau'] = 100$ МПа, где $[\tau']$ — допускаемое напряжение в шве при срезе.

При стыковой контактной сварке, а также при стыковой сварке трением и холодным способом в соединении могут быть приняты те же допускаемые напряжения, что и в стыковых соединениях при сварке дуговым методом при условии, если технологический процесс отработан и позволяет получить стабильные высокие механические свойства соединений.

Для соединений, выполненных точечной контактной и шовной сваркой, допускаемые напряжения среза в точке устанавливаются в зависимости от свойств металла и отработки технологического процесса. В точках и швах допускаемые напряжения среза для низкоуглеродистых и некоторых низколегированных сталей могут составлять 0,5 от допускаемых напряжений $[\sigma]_р$ основного металла при срезе и $0{,}3[\sigma]_р$ при отрыве.

Для швов второй группы сталей допускаемые напряжения назначаются на основе специально проведенных экспериментов в условиях, соответствующих работе проектируемой сварной конструкции, видам соединений и т. д.

Аналогичным образом допускаемые напряжения назначаются на основе специальных экспериментов для соединений сталей первой группы при сварке холодным способом, трением, ультразвуком и другими специальными методами.

Определение действительного распределения напряжений с учетом их концентрации в элементах и соединениях бывает трудным и при оценке работы конструкции, нагруженной статически, в большинстве случаев себя не оправдывает.

Излагаемые ниже методы расчета прочности ставят задачи оценить несущую способность, т. е. допускаемое усилие для проектируемых объектов и соединений, не определяя действительного распределения напряжений. Проектант принимает упрощенную схему напряженного состояния без учета концентрации напряжений, которая для него становится руководящей. Несущая способность конструкции определяется по разрушающему напряжению $\sigma_в$ и коэффициенту запаса по прочности $k_п$ или по напряжению $\sigma_т$, вызывающему текучесть, и коэффициенту запаса по текучести $k_т$, который меньше $k_п$. Расчеты проводятся на основе элементарных методов сопротивления материала.

Более глубокий анализ напряженного состояния, имеющего место в сварных объектах, и определение коэффициентов концентрации напряжений в них осуществляют на базе теории упругости и пластичности. Такие пути определения напряжений бывают необходимы при оценке прочности конструкций под переменными нагрузками, для установления с позиции механики разрушения условий распространения возникших в изделиях трещин, а также при учете собственных напряжений, вызванных сварочным процессом.

§ 3.3. СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ, ВЫПОЛНЕННЫЕ ДУГОВОЙ СВАРКОЙ

Существует несколько наиболее распространенных способов дуговой сварки.

Ручная дуговая сварка является далеко не совершенным способом, но универсальным технологическим процессом. Этим способом сваривают конструкции во всех пространственных положениях, из разных марок сталей, цветных сплавов в случаях, когда применение автоматических и полуавтоматических методов не представляется возможным, например при отсутствии требуемого оборудования, недостаточного освоения технологического процесса.

Соединения при автоматической и полуавтоматической сварке под флюсом, разработанной ИЭС им. Е. О. Патона совместно с другими НИИ и заводами, широко применяются в машиностроительной и строительной промышленности. Автоматическая сварка под флюсом применяется при сварке изделий с широким диапазоном изменения толщины 1. . .50 мм (иногда и более).

Применение автоматической и полуавтоматической дуговой сварки в среде защитного газа (CO_2), разработанной ЦНИИТМАШем, ИЭС им. Е. О. Патона, МГТУ им. Н. Э. Баумана и другими организациями, непрерывно расширяется. Этим способом производится укладка швов во всех пространственных положениях, хорошо свариваются элементы малых, средних и больших (до нескольких десятков миллиметров) толщин из углеродистых, низколегированных и некоторых высоколегированных сталей.

Конструкции из аустенитных, мартенситных и ферритных жаропрочных теплоустойчивых сталей, многих алюминиевых, титановых, медных, магниевых и других сплавов также успешно свариваются в среде защитных газов (аргона, гелия и др.).

Сварные соединения должны быть по возможности равнопрочными с основным металлом элементов конструкций при всех температурах во время эксплуатации, а также при всех видах нагрузок (статических, ударных, вибрационных).

Слабыми участками в сварных соединениях могут быть швы, зоны термического влияния и сплавления.

Зоной термического влияния называют участок основного металла, прилегающий к швам, который в результате сварки изменяет механические свойства.

Последиее обстоятельство особенно часто имеет место при сварке термически обработанных, а также нагартованных сталей и сплавов.

Улучшение механических свойств сварных соединений достигается:

выбором рациональной конструктивной формы соединения;

применением рациональных методов сварки;

термической и механической обработкой сварных конструкций после сварки.

Конструкции с равнопрочными сварными соединениями отвечают требованиям экономичности. Избыточная прочность сварного соединения по сравнению с целым элементом лишь удорожает конструкцию и не улучшает условий ее эксплуатации. Недостаточная прочность сварного соединения снижает несущую способность всей конструкции и не позволяет полностью использовать рабочие сечения ее элементов. Поэтому из условия равнопрочности расчетные усилия соединения определяют:

при растяжении

$$P = [\sigma]_р A; \tag{3.3}$$

при сжатии

$$P = [\sigma]_{сж} A; \tag{3.4}$$

при изгибе

$$M = [\sigma]_р W, \tag{3.5}$$

где $[\sigma]_р$ — допускаемое напряжение при растяжении; $[\sigma]_{сж}$ — допускаемое напряжение при сжатии; A — площадь поперечного сечения; W — момент сопротивления сечения.

В конструкциях со сварными соединениями в металле швов могут возникать напряжения двух родов: рабочие и связующие. Чтобы установить различие между рабочими и связующими напряжениями, рассмотрим несколько примеров.

На рис. 3.1, *а* изображены две полосы, соединенные стыковым швом. Полосы подвергаются растяжению. Очевидно, что при разрушении шва разрушится и вся конструкция. То же самое произойдет и в соединении, изображенном на рис. 3.1, *б*.

Сварные соединения, разрушение которых влечет за собой выход из строя конструкции, называются рабочими; напряжения, действующие в этих конструкциях,— рабочими напряжениями.

Совершенно иначе работает наплавленный металл в шве, соединяющем две полосы, показанные на рис. 3.1, *в*. Наплавленный металл, соединяющий полосы, деформируется вместе с основным, при этом в нем возникают напряжения. Если модуль упругости наплавленного металла незначительно отличается от модуля упругости основного, то в

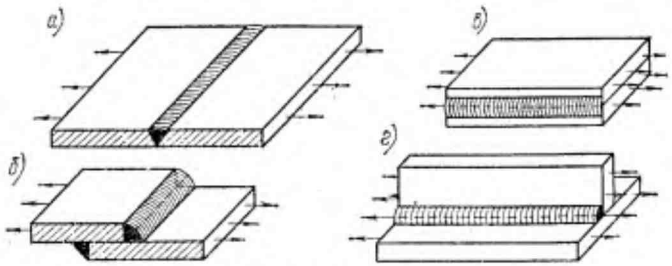


Рис. 3.1. Примеры рабочих (*а*, *б*) и связующих (*в*, *г*) швов

швах при их работе в пределах упругих деформаций образуются напряжения приблизительно той же величины, что и в растягиваемых полосах. Эти напряжения, возникающие в швах, вследствие их совместной работы с основным металлом во многих случаях не опасны для прочности конструкций и называются связующими. Пример связующих швов показан на рис. 3.1, *г*.

При расчете прочности сварных соединений определяют только рабочие напряжения. Исследования подтверждают, что в большинстве случаев при анализе прочности сварных конструкций связующие напряжения можно не учитывать.

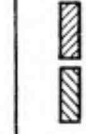
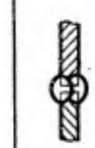
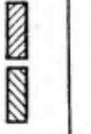
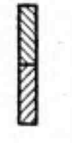
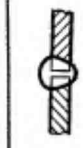
Основными типами сварных соединений являются соединения стыковые, нахлесточные, тавровые, угловые. В сварных конструкциях наиболее целесообразны стыковые соединения.

Стыковые соединения. Подготовка кромок стыкового соединения определяется технологическим процессом сварки и толщиной соединяемых элементов. В табл. 3.4 приведены примеры подготовки кромок стыковых соединений при сварке под флюсом по ГОСТ 8713—79.

Можно видеть, что обозначения С1, С2 и т. д. соответствуют определенному характеру выполнения шва (односторонний, двусторонний, на подкладке и т. д.) и форме подготовленных кромок. При других методах дуговой сварки подготовка кромок регламентируется ГОСТ 14771—76 (в защитном газе) и ГОСТ 5264—80 (ручная).

Таблица 3.4

Примеры стыковых соединений, выполняемых сваркой под флюсом (по ГОСТ 8713—79)

Форма подготовленных кромок	Характер выполненного шва	Форма поперечного сечения: подготовленных кромок	Форма поперечного сечения: выполненного шва	Пределы толщин свариваемых деталей, мм	Условное обозначение шва сварного соединения
1	2	3	4	5	6
С отбортовкой двух кромок	Односторонний			1,5...3,0	С1
	Двусторонний			2,0...20,0	С2
	Односторонний			2,0...12,0	С4
Без скоса кромок	Односторонний на флюсомедной подкладке			4,0...10,0	С6
	Двусторонний			14,0...24,0	С13

Продолжение табл. 3.4

Форма подготовленных кромок	Характер выполненного шва	Форма поперечного сечения: подготовленных кромок	Форма поперечного сечения: выполненного шва	Пределы толщин свариваемых деталей, мм	Условное обозначение шва сварного соединения
1	2	3	4	5	6
	Односторонний на флюсомедной подкладке			8,0...24,0	С17
Со скосом двух кромок	Односторонний на стальной подкладке			8,0...30,0	С18
С криволинейным скосом двух кромок	Двусторонний			24,0...160,0	С21
С двумя симметричными скосами двух кромок	Двусторонний			20,0...60,0	С30
С двумя несимметричными скосами двух кромок	Двусторонний с предварительным наложением подварочного шва			16,0...60,0	С34

При выполнении многослойных швов в защитном газе все чаще используют подготовку кромок без их скоса. Этот прием требует тщательной укладки слоев, его применяют при сварке элементов толщиной до 50 мм. Как правило, стыковые швы делают прямыми, т. е. направленными перпендикулярно действующим усилиям.

Применяется укладка валиков колеблющимся электродом с колебаниями поперек зазора в стыковом соединении одной или двумя скрученными или изогнутыми проволоками.

Швы укладываются указанным способом в нижнем и горизонтальном положениях в среде защитных газов и под флюсом.

Если элемент работает на растяжение, то допускаемое усилие в сварном соединении

$$P = [\sigma']_{\text{р}} sl; \tag{3.6}$$

при сжатии

$$P = [\sigma']_{\text{сж}} sl; \tag{3.7}$$

где s — толщина основного металла, так как усиление шва не учитывается; l — длина шва; $[\sigma']_{\text{р}}$ — допускаемое напряжение растяжения сварного соединения; $[\sigma']_{\text{сж}}$ — допускаемое напряжение сжатия сварного соединения.

При работе элементов из высокопрочных сталей наиболее слабым участком в сварном соединении оказывается не металл шва, а прилегающая к нему зона, которая в результате термического действия дуги или образования концентраторов напряжений может оказаться разупрочненной. В таких случаях необходимо заменить расчет прочности швов расчетом прочности соединений в ослабленных зонах с учетом особенностей механических свойств металла, его термической обработки и других факторов, зависящих от конкретных условий. Если стыковой шов направлен под углом α к усилию (как правило, $\alpha \approx 45°$), то его следует считать равнопрочным основному элементу.

Нахлесточные соединения. В нахлесточных соединениях швы называются угловыми.

При ручной сварке угловые швы имеют различные очертания: нормальные, условно принимаемые очерченными в форме равнобедренного треугольника, выпуклые, вогнутые (рис. 3.2, *а*. . .*в*).

Выпуклые швы нецелесообразны ни с технической, ни с экономической стороны. Они требуют больше наплавленного металла, вызывают концентрацию напряжений.

Целесообразны швы, имеющие очертания неравнобедренных треугольников с отношением основания к высоте 1,5 : 1,2 : 1,0 (рис. 3.2, *г*, *д*). В швах этого типа иногда производят механическую обработку концов, чтобы обеспечить плавное сопряжение наплавленного металла с ос-

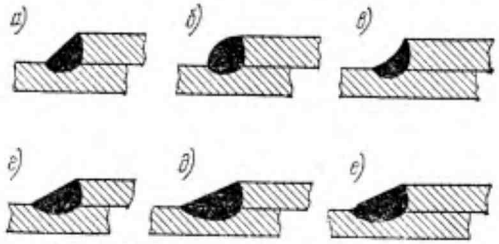


Рис. 3.2. Очертания угловых швов:
а — нормальное; *б* — выпуклое; *в* — вогнутое; *г* — с отношением катетов 1 : 1,5; *д* — с отношением катетов 1 : 2; *е* — то же, с обработкой конца шва

новным (рис. 3.2, *е*). Подобного рода швы, как будет показано ниже, целесообразно применять в конструкциях, работающих при циклических нагружениях.

В широкой практике конструирования распространено применение угловых швов с нормальными очертаниями

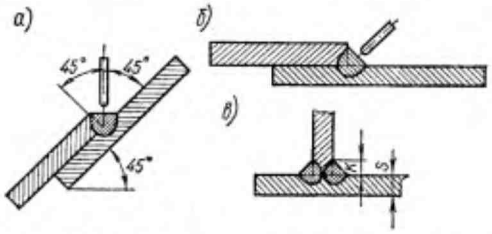


Рис. 3.3. Угловые швы при сварке под флюсом:
а — при укладке «в лодочку»; *б* — при укладке наклонным электродом; *в* — с глубоким проплавлением

(рис. 3.2, *а*). Размер катета углового шва нормального очертания обозначают K.

Угловые швы при сварке под слоем флюса получают с более глубоким проплавлением, чем при ручной сварке. Их очертания показаны на рис. 3.3, *а*. . *в*. Расчетная высота шва зависит от глубины проплавления, от технологического процесса сварки. Она определяется величиной $K \cdot \beta$. При ручной и многопроходной автоматической и полуавтоматической сварке $\beta=0{,}7$; для двух- и трехпроводной автоматической сварки и однопроходной полуавтоматической сварки $\beta=0{,}9$; для двух- и трехпроходной полуавтоматической сварки $\beta=0{,}8$; для однопроходной автоматической сварки $\beta=1{,}1$.

Наименьшая толщина рабочих швов в машиностроительных конструкциях 3 мм. Исключение составляют конструкции, в которых толщина самого металла меньше 3 мм. Верхний предел толщины швов не ограничен, но применение швов, у которых $K \geqslant 20$ мм, очень редко. В местах зажигания и обрыва дуги механические свойства швов ухудшаются, поэтому минимальную длину рабочих швов целесообразно ограничивать и принимать равной 30 мм. Швы меньших размеров применяют лишь в качестве нерабочих соединений. В зависимости от направления угловых швов по отношению к действующему усилию их разделяют на лобовые, косые, фланговые, комбинированные.

Лобовые швы направлены перпендикулярно усилию. В соединении, показанном на рис. 3.4, *а*, усилие P передается двумя лобовыми швами. Вследствие эксцентриситета элементы несколько искривляются. Расстояние между лобовыми швами следует принимать $C \geqslant 4s$. На рис. 3.4, *б* усилие передается через один лобовой шов на накладку; далее это же усилие переходит с накладки на второй лист. Таким образом, в соединении этого рода имеется лишь один расчетный шов.

Рассмотрим несущую способность угловых швов. В лобовом шве возникает несколько составляющих напряжений (рис. 3.4, *в*): нормальные напряжения σ на вертикальной плоскости шва в зоне сплавления и касательные напряжения τ на горизонтальной плоскости.

По методу, принятому в инженерной практике, расчет прочности лобовых швов производится на срез. Этот метод является условным и приближенным. При статических нагрузках и треугольном очертании шва слабым сечением считают наименьшее сечение, совпадающее с биссектрисой 0—0 прямого угла. По этой плоскости проверяют прочность лобового шва; напряжение при этом не должно превышать допускаемого $[\tau']$.

Формула определения допускаемого усилия P для соединения, состоящего из одного расчетного лобового шва (рис. 3.4, *б*, *в*), имеет следующий вид:

$$P=[\tau']\beta K l; \qquad (3.8)$$

для соединения, приведенного на рис. 3.4, *а*,

$$P = 2[\tau']\beta K l, \qquad (3.9)$$

где βK — расчетная высота шва; l — длина шва.

Фланговые швы направлены параллельно усилию (рис. 3.4, *г*). В них возникают два рода напряжений. В ре-

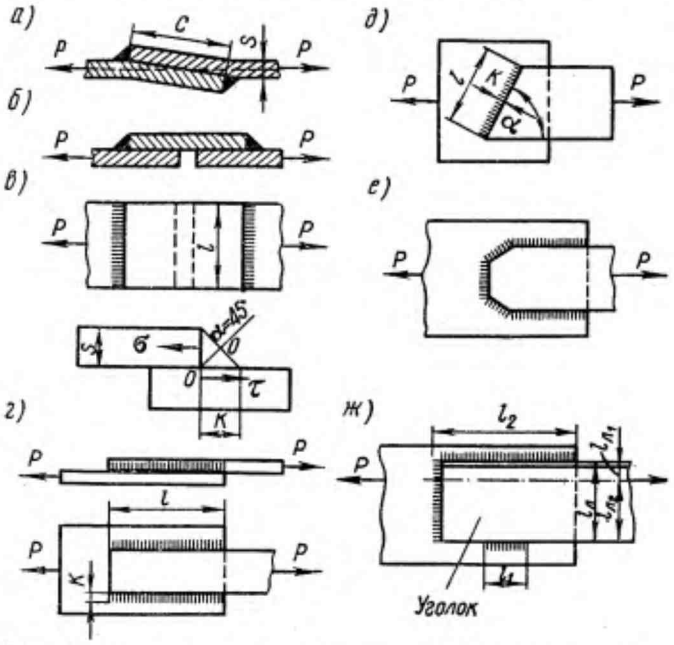


Рис. 3.4. Соединения с лобовыми и фланговыми швами:
а — с двумя расчетными лобовыми швами; *б* — с одним лобовым швом; *в* — схема усилия в лобовом шве; *г* — фланговые швы; *д* — косой шов; *е* — комбинированное соединение; *ж* — прикрепление уголка

зультате совместной деформации основного и наплавленного металла во фланговых швах образуются связующие напряжения. Как было указано выше, их не учитывают при определении прочности соединения. По плоскостям соприкосновения валика флангового шва с каждым из листов, а также в самом валике возникают напряжения среза, которые являются рабочими напряжениями соединения.

Расчет прочности швов производится по опасной плоскости среза, совпадающей с биссектрисой прямого угла. Расчетная формула несущей способности составлена в предположении, что напряжения вдоль флангового шва распределены равномерно.

Для конструкции, приведенной на рис. 3.4, *г*, расчетная формула имеет вид

$$P = 2[\tau']\beta K l. \qquad (3.10)$$

С учетом концентрации напряжений расчетная длина фланговых швов $l \leqslant 50K$.

Косые швы направлены к усилию под некоторым углом α (рис. 3.4, *д*). Их часто применяют в сочетании с лобовыми и фланговыми.

Расчет прочности косых швов производится аналогично описанному выше:

$$P = [\tau']\beta K l. \qquad (3.11)$$

Пример комбинированных швов приведен на рис. 3.4, *е*.

Распределение усилий в отдельных швах, составляющих комбинированное соединение, не одинаково. Однако расчет прочности комбинированных соединений производится согласно хорошо известному из курса сопротивления материалов принципу независимости действия сил. В соединении с лобовыми и фланговыми швами несущая способность определяется как

$$P = P_л + P_{фл}, \qquad (3.12)$$

где P — допускаемое усилие для комбинированного соединения; $P_л$ — допускаемое усилие лобового шва; $P_{фл}$ — допускаемое усилие для фланговых швов.

Таким образом,

$$P = [\tau'](\beta K l_л + 2\beta K l_{фл}). \qquad (3.13)$$

Если катеты всех швов, входящих в состав комбинированного соединения, равны между собой, то

$$P = [\tau']\beta K L, \qquad (3.14)$$

где L — длина периметра швов.

Данным соотношением пользуются при расчете соединения, показанного на рис. 3.4, *е*.

Некоторую особенность представляет расчет прочности швов, прикрепляющих уголок, работающий под действием продольной силы. Принимаем, что усилие P в уголке действует в плоскости прикрепленной полки (рис. 3.4, *ж*).

Усилие, воспринимаемое лобовым швом, равно

$$P_л = [\tau']\beta K l_л. \qquad (3.15)$$

Эксцентриситет приложения силы в расчете не учитывается.

Усилие, передаваемое на фланговые швы,

$$P_{фл} = P - P_д. \qquad (3.16)$$

Это усилие распределяется между швами обратно пропорционально расстоянию от оси уголка до обеих кромок.

Таким образом, усилие в шве l_1 будет

$$P_1 = 0{,}3P_{фл}; \qquad (3.17)$$

усилие в шве l_2

$$P_2 = 0{,}7P_{фл}. \qquad (3.18)$$

При расчете прочности прикреплений равнобоких уголков приближенно можно принять

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{l_{д_2}}{l_{д_1}}.$$

Касательные напряжения в швах

$$\tau_1 = \frac{P_1}{\beta K l_1}; \quad \tau_2 = \frac{P_2}{\beta K l_2}. \qquad (3.19)$$

Напряжения в каждом из фланговых швов не должны превышать допускаемого.

Конструктивно можно увеличить длину l_1 относительно размеров, требуемых по расчету прочности, до значения l_2.

Более точный метод расчета предусматривает учет не только срезывающей силы, но и момента силы относительно центра тяжести швов.

При приближенных расчетах прочности соединений с комбинированными швами принимают распределение касательных напряжений равномерным по всему периметру.

При этом

$$\tau = \frac{P}{\beta K L}, \qquad (3.20)$$

где L — длина периметра лобового и фланговых швов, прикрепляющих нагруженный элемент, в том числе и при прикреплении фланговых и лобовых швов уголка.

Тавровые соединения применяют для соединения элементов, расположенных во взаимно перпендикулярных плоскостях. Тавровые соединения обычно можно выполнять без подготовки кромок (рис. 3.5, *а*).

На рис. 3.5, *б* показаны тавровые соединения с односторонней подготовкой кромок и подваром при толщине листов 4. . .26 мм, а на рис. 3.5, *в* — с двусторонней подготовкой кромок элементов толщиной 12. . .60 мм.

При работе соединений (рис. 3.5, *а*) на растяжение расчетная формула прочности имеет такой вид:

$$P = 2[\tau']\beta K l; \qquad (3.21)$$

для соединений, приведенных на рис. 3.5, *б*, *в*,

$$P = [\sigma']_р sl. \qquad (3.22)$$

При работе узла, изображенного на рис. 3.5, *а*, на сжатие усилие P в действительности часто передается с горизонтального листа на вертикальный через плоскость соприкосновения листов. Проверка прочности швов соединения в этом случае производится исходя из условного предположе-

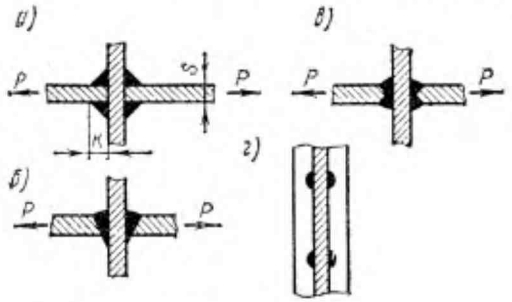


Рис. 3.5. Тавровые соединения



Рис. 3.6. Угловые соединения

ния, что усилие передается через швы. При этом $[\tau']$ повышается до величины $[\sigma']_{сж}$.

При сварке автоматами тавровые соединения могут выполняться угловыми точечными швами (рис. 3.5, *г*). Применение точечных швов целесообразно главным образом в конструкциях с толщиной листов $s \leqslant 4. . .5$ мм.

Угловые соединения, выполняемые дуговой сваркой вручную, показаны на рис. 3.6, *а*.

При автоматическом и полуавтоматическом способах сварки соединения имеют вид, приведенный на рис. 3.6, *б* (s=6. . .14 мм) и на рис. 3.6, *в* (s=10. . .40 мм).

Угловые соединения в основном применяются в связующих элементах и расчету на прочность не подлежат.

По вопросу определения несущей способности угловых швов в соединениях внахлестку (лобовых и фланговых), а также втавр следует сделать следующие замечания.

Прочность угловых швов зависит от ряда дополнительных обстоятельств, к числу которых следует отнести:

ухудшение свойств от металлургических факторов вследствие примесей, плохой защиты шва; учитывается с помощью коэффициента η_1;

геометрические факторы — непостоянство размеров катетов; учитывается с помощью коэффициента η_2;

технологические факторы — отклонения от режима; учитывается с помощью коэффициента η_3;

механические факторы — неравномерное распределение усилий в соединениях между швами; учитывается с помощью коэффициента η_4.

Таким образом, допускаемые напряжения в перспективе целесообразно определять с учетом указанных факторов. Но для этого необходима статистическая обработка большого производственного материала. Это вопрос будущего.

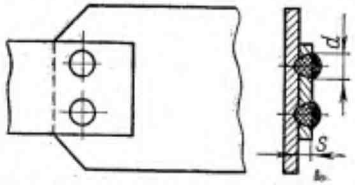


Рис. 3.7. Проплавное соединение

Пробочные проплавные соединения ставятся дуговой сваркой при нахлесточном расположении листов. Проплавляется верхний более тонкий лист, в результате чего образуются круглые проплавные сварные соединения (рис. 3.7). Пробочные соединения рациональны при толщине верхнего листа, как правило, не более 5 мм.

При применении усовершенствованного оборудования с принудительной подачей электродной проволоки в зону дуги можно сваривать проплавными пробочными соединениями элементы толщиной более 10 мм. Такие соединения получают сверлением отверстий в одном из соединяемых листов и заполнением их наплавленным металлом. При этом диаметр отверстий d может достигать 40 мм. Разработаны установки для выполнения пробочных соединений различных марок сталей в защитной среде CO_2.

Ввиду простоты оборудования и высокой производительности процесса проплавные пробочные соединения весьма экономичны. Их применяют, в частности, при изготовлении конструкций сельскохозяйственных машин.

В большинстве случаев пробочные соединения являются связующими и рабочих усилий не передают. Расчет прочности соединений, участвующих в передаче усилий, производят аналогично расчету прочности точечных соединений при контактной сварке.

Дуговые соединения алюминиевых сплавов. Дуговой сваркой свариваются практически все алюминиевые сплавы, но свариваемость их различна. Сварные соединения алюминиевых сплавов обладают повышенной чувствительностью

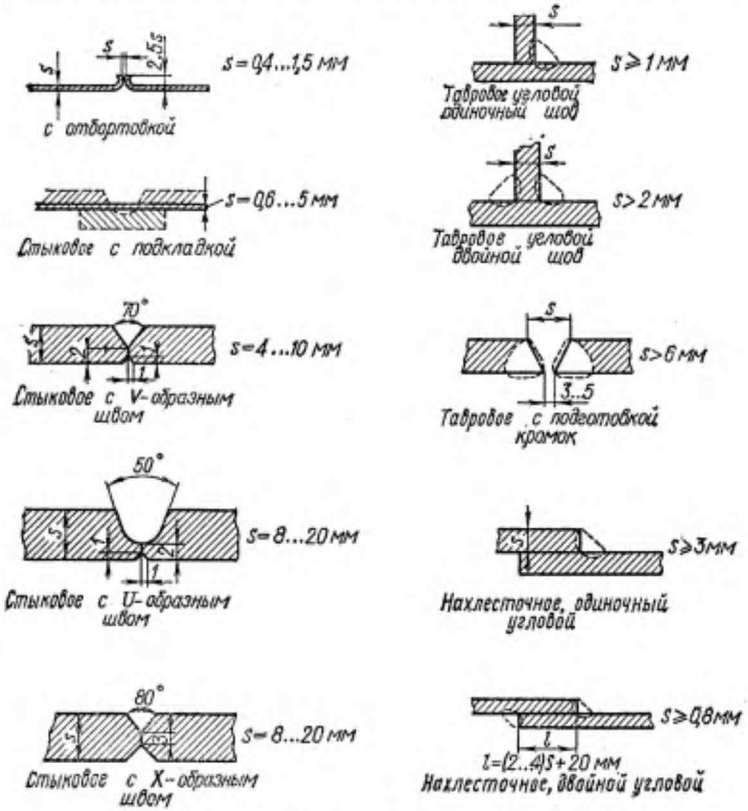


Рис. 3.8. Сварные соединения алюминиевых сплавов

к концентраторам напряжений по сравнению с рядом сталей, применяемых в конструкциях. Поэтому к соединениям из алюминиевых сплавов предъявляют ряд требований, относящихся к их конструктивному оформлению и предотвращению повреждений изделий в процессе производства. На рис. 3.8 приведены рациональные виды сварных соединений из алюминиевых сплавов.

На рис. 3.9, *а*, *б* приведены примеры стыковых соединений деталей из алюминиевых сплавов разных толщин при отсутствии эксцентриситета, на рис. 3.9, *в*, *г* — при наличии эксцентриситета.

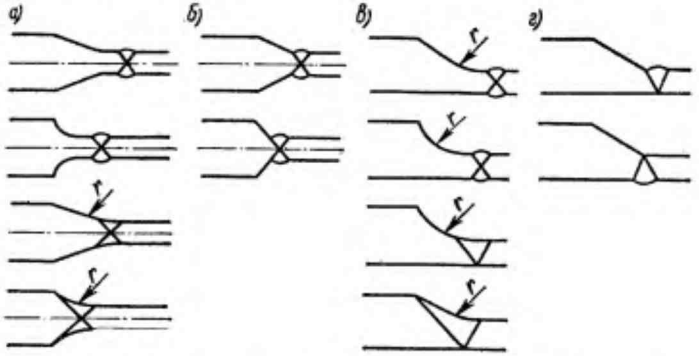


Рис. 3.9. Стыковые соединения алюминиевых сплавов:
а, *в* — рациональные; *б*, *г* — нерациональные

Предусмотрены варианты плавных сопряжений радиусом *r* швов с основным металлом (рис. 3.9, *а*, *в*). Это сделано в

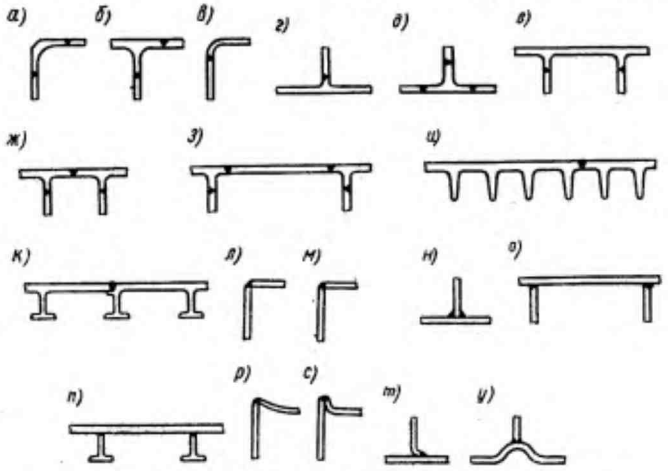


Рис. 3.10. Виды элементов алюминиевых конструкций

целях устранения концентраторов напряжений, понижающих предел прочности соединений (рис. 3.9, *б*, *г*).

При изготовлении конструкций из алюминиевых сплавов рекомендуется применять стыковые соединения, а также соединения, в которых сварные швы расположены в зонах пониженных рабочих напряжений. Целесообразны конструкции повышенной гибкости (деформируемости).

На рис. 3.10 приведены многочисленные примеры рациональных и нерациональных сварных соединений из алюминиевых сплавов. Соединения на рис. 3.10, *а* . . .*к* рациональны, так как сварные швы удалены от зоны резкого изменения сечений. Соединения на рис. 3.10, *л*. . .*п* имеют значительную угловую жесткость и находятся в зоне концентрации. По сравнению с ними соединения, показанные на рис. 3.10, *р*. . .*у*, несколько лучше, поскольку в них обеспечена повышенная податливость.

Титановые сплавы по ряду параметров аналогичны алюминиевым, в частности по чувствительности к концентраторам напряжений. Поэтому и оформление сварных соединений в конструкциях из титановых сплавов не имеет существенных отличий от соединений из алюминиевых сплавов.

§ 3.4. СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ, ВЫПОЛНЕННЫЕ КОНТАКТНОЙ СВАРКОЙ

Соединения при стыковой сварке. Контактная стыковая сварка имеет распространение в различных конструкциях. Особенно эффективно ее применение при сварке изделий в

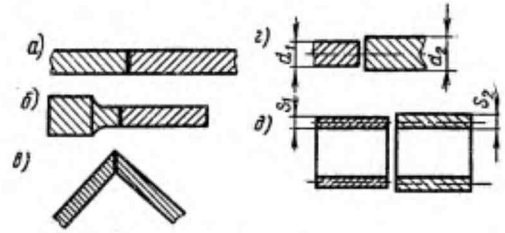


Рис. 3.11. Соединения при стыковой контактной сварке

массовом производстве, например арматуры железобетона, типизированных конструкций рам, продольных швов труб. Хорошо свариваются конструкции из низкоуглеродистых, углеродистых и некоторых высоколегированных сталей с площадью поперечного сечения до нескольких сотен квадратных сантиметров.

Контактным способом получают стыковые соединения элементов с круглыми, квадратными, прямоугольными, трубчатыми, профильными сечениями (уголки, тавры, рель-

сы). С увеличением периметра детали и уменьшением ее толщины процесс сварки усложняется. Наиболее хорошо соединяются элементы одинакового поперечного сечения (рис. 3.11, *а*. . .*в*). Диаметры d_1 и d_2 соединяемых элементов круглого сечения (рис. 3.11, *г*), а также толщины труб s_1 и s_2 (рис. 3.11, *д*) по возможности не должны отличаться друг от друга более чем на 15%.

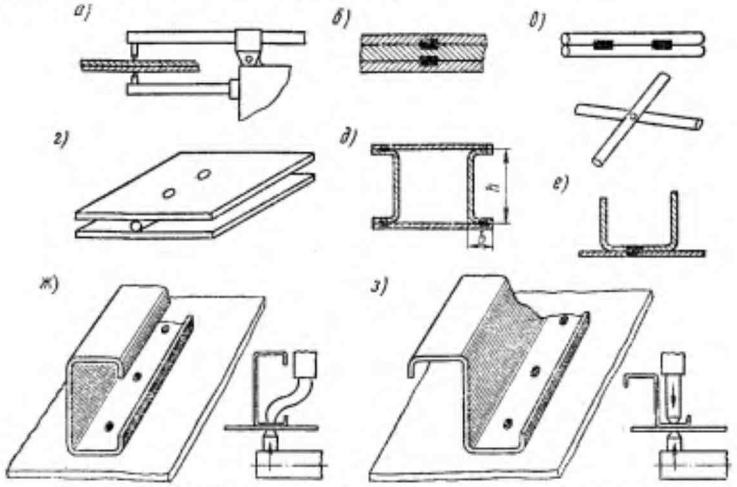


Рис. 3.12. Примеры соединений при точечной сварке:
а, б — плоские заготовки; *в, г* — цилиндрические заготовки; *д, з* — рациональное соединение; *е, ж* — нерациональное соединение

Возможность контактной сварки больших поперечных сечений зависит от используемого оборудования. ИЭС им. Е. О. Патона созданы установки для сварки газопроводных труб диаметром 1420 мм, и это не является пределом. Площадь поперечных сечений деталей, свариваемых контактным способом, приближается к 1000 см². Специальный расчет прочности стыков, сваренных контактным способом и работающих под статической нагрузкой, не производится. Прочность стыка соответствует прочности самого элемента. Стыковой контактной сваркой сваривают не только различные марки сталей, но и цветные сплавы.

Соединения при точечной сварке. В большинстве случаев точечной сваркой сваривают изделия при условии расположения электродов с двух сторон относительно свариваемых частей. Это предъявляет определенные требования к габариту конструкций. Разработаны установки, позволяющие производить точечную сварку при одностороннем расположении обоих электродов.

Точечной контактной сваркой наиболее часто соединяют элементы, имеющие малые толщины — от долей до нескольких миллиметров (рис. 3.12, *а*). Хорошо свариваются прочные и высокопрочные углеродистые стали, различные сплавы, в частности алюминиевые и титановые.

Не рекомендуется допускать точечных соединений элементов, отношение толщин которых больше 3. Точечной сваркой можно сваривать также три и более деталей. При этом элемент большей толщины следует укладывать между двумя другими (рис. 3.12, *б*).

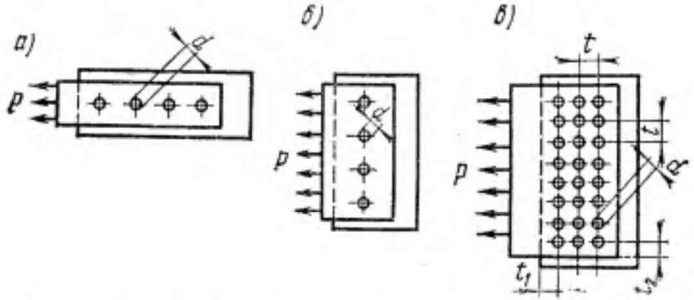


Рис. 3.13. Виды соединений с несколькими точками в зависимости от направления нагрузки σ:
а — продольное; *б* — поперечное; *в* — смешанное

Сварными точками соединяют между собой не только плоские, но и цилиндрические детали (рис. 3.12, *в*), стержни круглого сечения с пластинами (рис. 3.12, *г*) и т. п. Весьма целесообразны для сварки точками заготовки, имеющие открытые профили или с отбортовкой (рис. 3.12, *д*). На рис. 3.12, *е* показан узел менее рациональный, так как в процессе сварки бóльшая масса металла вводится в контур вторичной цепи, вследствие чего увеличивается индуктивное сопротивление машины. На рис. 3.12, *ж* показана конструкция, свариваемая изогнутым электродом, трудно выполняемая на точечной машине; на рис. 3.12, *з* изображен рациональный узел.

В сварном точечном соединении приняты следующие обозначения (рис. 3.13, *а*. . .*в*): d — диаметр точки; t — шаг точки; t_1 — расстояние от центра сварной точки до края детали в направлении действия силы P; t_2 — расстояние от точки до свободной кромки в направлении, перпендикулярном действию силы P (t_1 и t_2 нормируются с учетом технологических и силовых факторов).

Расстояние между центрами точек в соединении должно быть не меньше некоторого предельного размера ввиду шунтирования тока через ранее сваренную точку. Чем больше расстояние между сварными точками, тем меньше шунтирование тока, следовательно, стабильнее и лучше

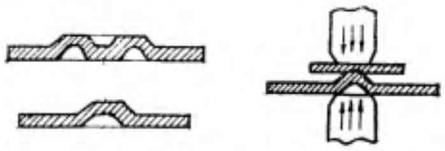


Рис. 3.14. Подготовка элементов и схема рельефной сварки

результаты сварки. Диаметр точки d назначается в зависимости от толщины соединяемых элементов с учетом обеспечения высококачественного технологического процесса. Диа-

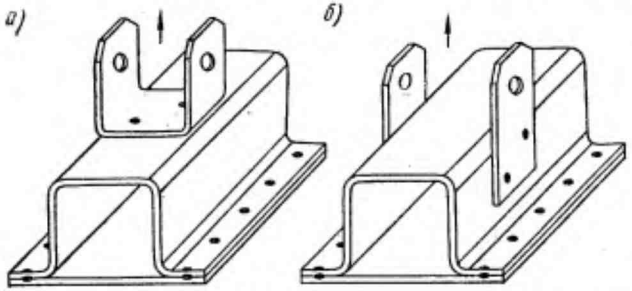


Рис. 3.15. Нерациональная (*а*) и рациональная (*б*) конструкции узлов с точечными соединениями

метр электрода $d_э$ контактной машины подбирается исходя из необходимого d. Как правило, $d=(0{,}8\ldots1{,}0)d_э$.

Для стальных деталей рекомендуется $d=1{,}2s+4$ мм при $s\leqslant1{,}5\ldots3{,}0$ мм; $d=1{,}5s+5$ мм при $s\geqslant3$ мм (s — наименьшая толщина свариваемых частей).

В некоторых случаях строительные конструкции имеют точки диаметром около 3,5s и более. Можно принимать $t=3d$, $t_1=2d$, $t_2=1{,}5d$.

В практике иногда применяют соотношение между t, s и d:

$$d=1{,}4\sqrt{0{,}01t^2+ts}-0{,}1t. \qquad (3.23)$$

Для улучшения качества соединений точечную сварку иногда заменяют рельефной, при этом более точно фиксируется зона пропускания тока, уменьшается эффект шунтирования (рис. 3.14).

Точки в сварном соединении следует располагать таким образом, чтобы они воспринимали преимущественно усилия среза, а не отрыва. На рис. 3.15, *а* показана нерациональная конструкция (точки в ней работают на отрыв); на рис. 3.15, *б* — рациональная.

В соединениях, изображенных на рис. 3.16, *а*, *б*, расчет прочности производится на срез. Сварные точки могут быть односрезными (рис. 3.16, *а*) и двусрезными (рис. 3.16, *б*).

Расчетное напряжение в односрезной точке

$$\tau=\frac{4P}{\pi d^2}\leqslant[\tau_0']; \qquad (3.24)$$

в двусрезной точке

$$\tau=\frac{2P}{\pi d^2}\leqslant[\tau_0'], \qquad (3.25)$$

где $[\tau_0']$ — допускаемое напряжение в точке при срезе; d — диаметр точки; P — усилие, передаваемое на одну точку.

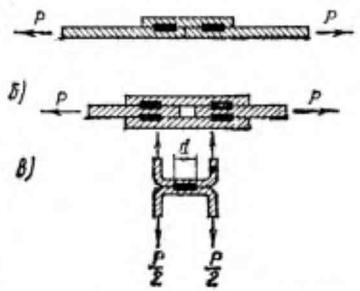


Рис. 3.16. Точечное соединение, работающее на срез и отрыв:

а — односрезные точки; *б* — двусрезные точки; *в* — работа на отрыв

В действительности в точечном соединении могут иметь место две формы разрушения: срез точек и разрыв основного металла в зоне соединения. Увеличение диаметра точки повышает ее сопротивление срезу; увеличение толщины детали повышает сопротивление основного металла разрыву. При назначении диаметра согласно формуле (3.23) расчет прочности точек можно производить только на срез. При работе сварной точки на отрыв, например в конструкции, изображенной на рис. 3.16, *в*, расчетное напряжение будет

$$\sigma=\frac{4P}{\pi d^2}\leqslant[\sigma_0'], \qquad (3.26)$$

где $[\sigma_0']$ — допускаемое напряжение в точке при отрыве.

Допускаемое напряжение в точке при отрыве $[\sigma_0']$ следует принимать еще более низким, чем $[\tau_0']$. При этом целесообразно пользоваться данными значениями экспериментов.

Для легированных сталей и цветных сплавов допускаемое напряжение в точечных соединениях принимают на

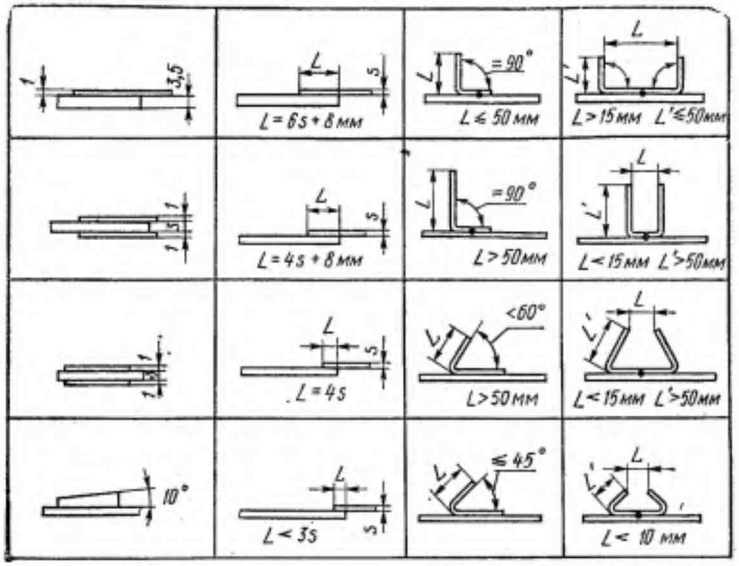


Рис. 3.17. Профильные элементы с точечными соединениями

основе результатов экспериментов с учетом условий нагружения и других факторов.

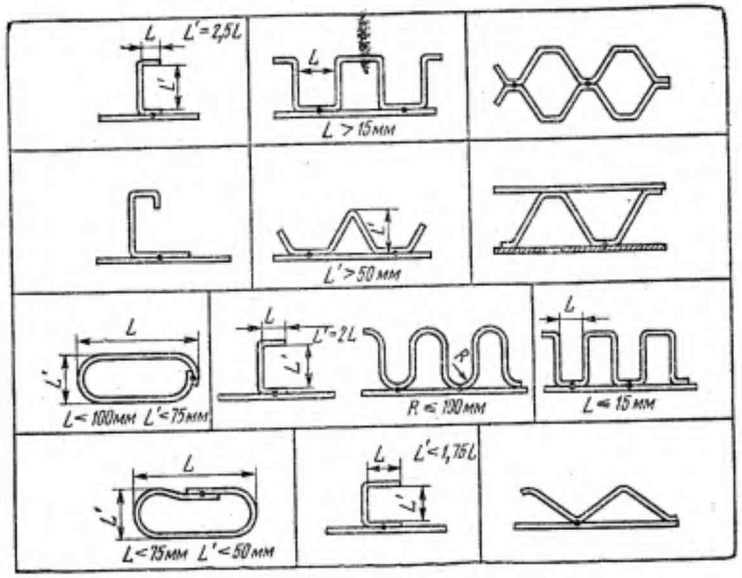
Например, для алюминиевых сплавов расчетное усилие на срез при точечном соединении, выполненном контактной сваркой на машинах с импульсом постоянного тока, можно определять в зависимости от толщины основного металла и вида сплава, пользуясь табл. 3.5.

Таблица 3.5

Расчетные усилия на срез одной точки точечного соединения алюминиевых сплавов P, кН

Толщина наиболее тонкого металла в соединениях, мм	АМц	АМг6	АВТ1	В92Т
1,0	0,9	1,0	1,2	1,4
1,5	—	1,7	2,0	2,5
2,0	—	2,4	2,9	3,5
2,5	—	3,2	3,9	4,6
3,0	—	4,0	5,0	6,0
4,0	—	7,0	9,0	11,0

Практически, наиболее часто соединения конструируются смешанными (см. рис. 3.13, *в*). Напряжение в точке



такого соединения определяется в условном предположении, что все точки работают равномерно:

$$\tau = \frac{4P}{i\pi d^2} \leqslant [\tau_0'], \qquad (3.27)$$

где i — число односрезных сварных точек в соединении.

Если имеем точки двусрезные, то i — общее число плоскостей среза в соединении. С учетом неравномерного распределения усилий между точками допускаемое напряжение $[\tau_0']$ в смешанном соединении целесообразно снизить на 10. . .20%.

Часто в конструкциях сварные точки являются связующими и рабочих напряжений не передают. Например, при формировании профилей элементов конструкций, которые воспринимают продольное усилие, точки служат для связи между отдельными частями. Соединения обшивок с каркасом также часто осуществляют точками. Указанные точки при статических нагрузках в большинстве случаев не оказывают существенного влияния на прочность. Примеры сварки профильных элементов точками приведены на рис. 3.17. В верхнем горизонтальном ряду даны точечные соединения, особенно удобные для сварки; во втором ряду — удобные; в третьем — не вполне удобные; в четвертом — трудные.

Соединения при шовной сварке. Шовная контактная сварка допускает возможность соединения элементов от весьма малых толщин до суммарной толщины 4. . .6 мм сталей и цветных сплавов. Шовной сваркой, как правило, соединяют изделия при расположении роликов с обеих сторон соединяемых частей (рис. 3.18, *а*, *б*), но можно производить сварку и на подкладке при расположении роликов с одной стороны (рис. 3.18, *в*). При шовной сварке между соединяемыми элементами образуется шов путем постановки ряда точек, перекрывающих друг друга.

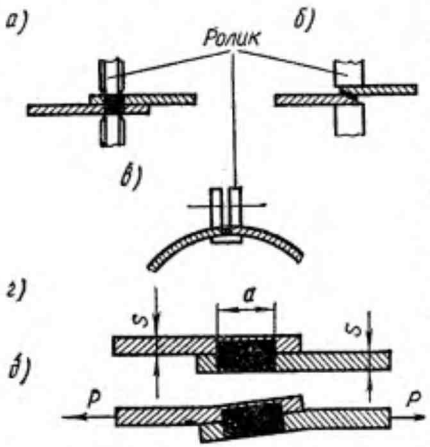


Рис. 3.18. Соединения при шовной сварке:

а — нахлесточное без скоса кромок; *б* — нахлесточное со скосом кромок (редко применяется); *в* — стыковое без подготовки кромок (редко применяется); *г* — сечение шва; *д* — деформация соединения после приложения растягивающей силы

Нахлесточные соединения образуют в соединениях эксцентриситеты, в результате которых возникают помимо основных продольных сил изгибающие моменты. При этом прямолинейные элементы (рис. 3.18, *г*) несколько искривляются (рис. 3.18, *д*).

Поскольку элементы, свариваемые шовной сваркой, имеют малые толщины, влияние изгибающего момента незначительно и его при расчете прочности не учитывают.

Напряжения в швах при шовной сварке определяют по условию среза

$$\tau = \frac{P}{la}, \qquad (3.28)$$

где P — сила, действующая в соединении; a — ширина шва; l — длина шва.

§ 3.5. СОЕДИНЕНИЯ ПРИ СПЕЦИАЛЬНЫХ МЕТОДАХ СВАРКИ

Соединения при электрошлаковой сварке. Электрошлаковая сварка является одним из прогрессивных бездуговых процессов сварки. Она обеспечила создание комбинированных прокатно-лито-ковано-штампованных изделий больших сечений, объединенных в единый агрегат.

Этим способом сваривают конструкции рам, барабанов, крупных машиностроительных узлов, сооружений металлургических комплексов и т. п. При электрошлаковой сварке укладку швов производят в вертикальном положении, выполняют стыковые, угловые и тавровые соединения. Нередко эти соединения являются не рабочими, а связующими. Электронно-лучевой сваркой соединяют в основном элементы, имеющие толщины 30. . .1000 мм и более, но в некоторых случаях сваривают и меньшие толщины. Этим методом соединяют между собой листы, плиты, тела круглого сечения, толстостенные трубы, например пустотелые валы и т. п.

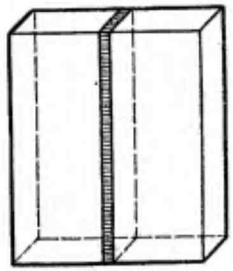


Рис. 3.19. Пример шва при электрошлаковой сварке

Электрошлаковой сваркой можно соединять различные марки сталей: низкоуглеродистые, углеродистые, низколегированные и др. Такая сварка не требует скоса кромок, очень производительна и экономична (мало расходуется присадочной проволоки и флюсов). Однако конструкции, сваренные электрошлаковой сваркой, при большой толщине стенок часто приходится подвергать термической обработке — отпуску и нормализации для снятия остаточных напряжений и улучшения структуры. Это несколько удорожает производство.

Электрошлаковой сваркой свариваются детали из титановых и алюминиевых сплавов.

На рис. 3.19 приведен пример соединения, выполненного электрошлаковой сваркой. В большинстве случаев расчет швов при электрошлаковой сварке не отличается от проверки напряжений в основном элементе конструкции, так как площадь шва бывает при этом эквивалентна площади основного металла. Приходится лишь в некоторых случаях в месте стыков понижать допускаемое напряжение. Примеры соединений (угловых и тавровых), полученных электрошлаковой сваркой, приведены на рис. 3.20, *а*. . .*д*.

Соединения при сварке трением. Метод эффективен, так как при этом расходуется малое количество энергии. Зона разогрева имеет небольшую протяженность, а соединения достаточно прочны. Этим методом сваривают инструменты, приваривают режущую часть к державке из поделочной ста-

ли. Его используют при изготовлении закладных частей арматуры железобетона, при сварке некоторых изделий из труб, деталей машин.

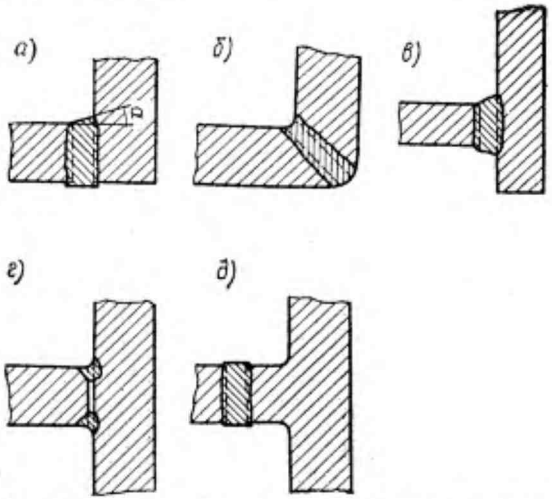


Рис. 3.20. Примеры соединений при электрошлаковой сварке:
а, б — угловые; *в, г* — тавровые; *д* — стыковые

Сварка трением производится согласно одной из схем, изображенных на рис. 3.21, *а*. . .*г*. В процессе относительного вращения деталей, прижатых друг к другу, торцы

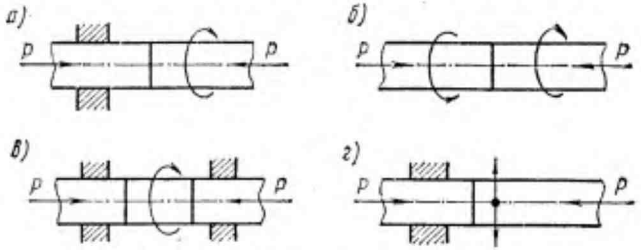


Рис. 3.21. Схема сварки трением:
а — при вращении одной детали; *б* — при вращении обеих деталей; *в* — сварка с вращающейся проставкой; *г* — при поступательно-возвратном движении

соединяемых элементов разогреваются. При достижении нужной температуры, зависящей от материала, вращение прекращают и, увеличивая силу P, производят осадку. Хорошо свариваются между собой не только однородные,

но и разнородные металлы, например сталь + медь + алюминий.

При сварке трением получают стыковые и тавровые соединения (рис. 3.22) с высокими механическими свойствами. Расчетные напряжения в сварном соединении при

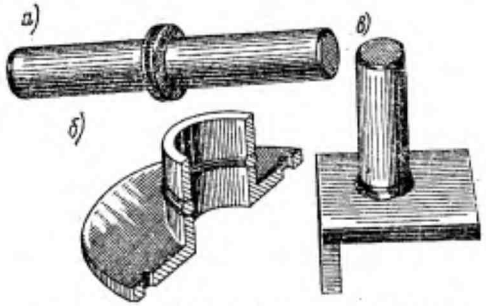


Рис. 3.22. Примеры сварки трением:
а, б — стыковые; *в* — тавровые

этом оказываются эквивалентными напряжениям в основном металле. Допускаемые напряжения устанавливаются на основе специальных опытов.

Соединения при диффузионной сварке. Диффузионная сварка позволяет соединять металлы, неметаллические материалы и металлы с неметаллическими материалами. Сварка производится в вакуумных камерах при сжатии соединяемых элементов и их нагреве до температур, меньших температуры плавления материала. Поэтому в таких сварных соединениях не наблюдается существенных изменений физико-механических свойств по сравнению с основным материалом. Очень большое влияние на механические свойства соединений оказывают температура нагрева, удельное давление на контактных поверхностях, степень вакуума в камере, способ подготовки поверхностей, продолжительность процесса.

Диффузионная сварка позволяет осуществить многообразные формы соединений по: плоскости; конической поверхности; цилиндрической поверхности; сложным рельефным поверхностям.

Определение расчетных напряжений в соединениях при этом способе сварки производится так же, как и в элементах основной конструкции. Допускаемые напряжения должны быть назначены согласно проведенным специальным экспериментам.

Соединения холодной сваркой. Холодной сваркой называют процесс соединения металлов в результате пластической деформации путем осадки без нагрева. Наилучшим образом соединяются холодной сваркой металлы с кубической гранецентрированной структурой, обладающие хорошими пластическими свойствами: алюминий, медь, их сплавы, аустенитная сталь и т. д.

Вакуум значительно улучшает условия холодной сварки. Очистка и выравнивание свариваемых поверхностей,

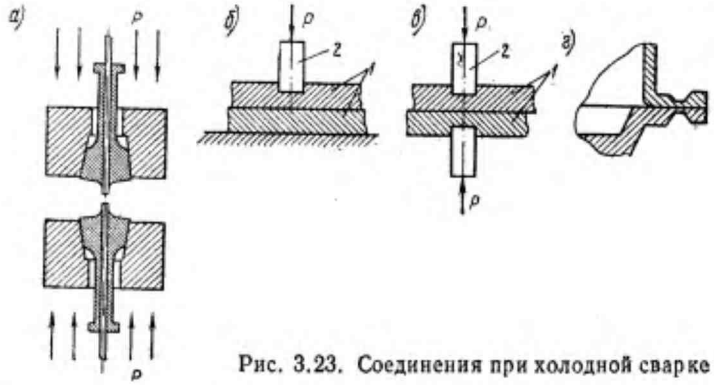


Рис. 3.23. Соединения при холодной сварке

а также создание на них активных центров достигаются за счет пластической деформации.

При холодной сварке выполняются стыковые и нахлесточные соединения.

Схема холодной сварки стыкового соединения приведена на рис. 3.23, *а*. На рис. 3.23, *б*, *в* показана схема холодной точечной сварки (*1* — свариваемые листы, *2* — пуансоны). При углублении пуансона *2* происходит пластическая деформация. Если заменить точечные пуансоны роликовыми, то можно получить холодной сваркой шовное соединение (рис. 3.23, *г*).

Точечный и шовный виды холодной сварки чаще применяют в связующих или слабонапряженных соединениях, так как вдавливание вызывает концентрацию напряжений. Несущую способность соединений устанавливают экспериментально с учетом свойств металлов и технологии производства работ.

Расчет прочности стыковых соединений, сваренных холодным способом, может не производиться вовсе, так как их свойства часто не отличаются от свойств основного материала. Расчет прочности сварных точек в нахлесточ-

ных соединениях производится на срез. На отрыв такие точки работают недостаточно удовлетворительно. Допускаемые напряжения назначаются по опытным данным.

Холодная сварка применяется в электротехнике, вакуумном машиностроении и т. д.

Соединения при ультразвуковой сварке. Сварка ультразвуком металлов применяется в приборостроении. При ультразвуковой сварке соединяются поверхностные слои металла, освобожденные от окисных пленок и адсорбированных газов (рис. 3.24).

Способность ультразвуковых колебаний разрушать поверхностные пленки дает возможность сварки металлов с защитными покрытиями. Ультразвуком соединяются пластичные металлы, алюминий, медь, аустенитная сталь, тантал. Возможно сваривание неметаллических материалов, например керамики.

Ультразвуком сваривают элементы малых толщин, как правило, не свыше 1. . .2 мм и особенно хорошо свариваются очень тонкие элементы. Возможна приварка тонкого элемента к толстому.

При ультразвуковой сварке получают точечные и шовные соединения, аналогичные соединениям контактной сварки. Расчет прочности производится на срез так же, как и расчет соединений, выполненных контактной сваркой. Допускаемые напряжения определяются на основе специальных экспериментов.

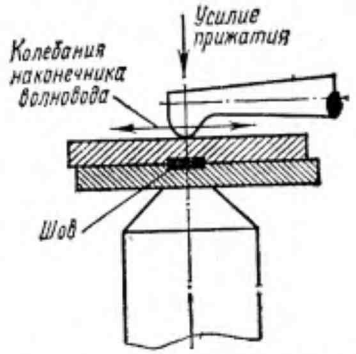


Рис. 3.24. Схема ультразвуковой сварки металла

Соединения при электронно-лучевой сварке. Электронно-лучевая сварка производится в вакууме в специальных камерах. Эту сварку применяют для специальных сортов сталей, тугоплавких и активных металлов, например тантала, циркония, молибдена и др. Целесообразно использование ее для некоторых марок титановых и алюминиевых сплавов, а также для соединения разнородных материалов.

При электронно-лучевой сварке источник тепла сконцентрирован в малом объеме, поэтому зоны проплавления и термического влияния имеют весьма малую ширину. Благодаря относительно высокой степени вакуума в камере (0,1. . .0,01 Па) механические свойства сварных сое-

динений при этом способе сварки оказываются высокими. Электронно-лучевой сваркой выполняют стыковые, нахлесточные (рис. 3.25, *а*) и тавровые (рис. 3.25, *б*) соединения. Кроме того, оказывается возможным выполнять швы в замкнутых объемах. Укладку швов можно производить при разных пространственных положениях. Электронно-лучевая сварка находит применение в элементах как малых, так и сверхбольших толщин в энергетическом машиностроении, в приборостроении и т. д. Расчет прочности соединений при электронно-лучевой сварке во многих случаях сводится лишь к расчету прочности основной детали, так как соединения могут быть приняты равнопрочными основной детали. Нередко правильная оценка прочности соединений, особенно разнородных металлов, производится на основе специально проведенных экспериментов.

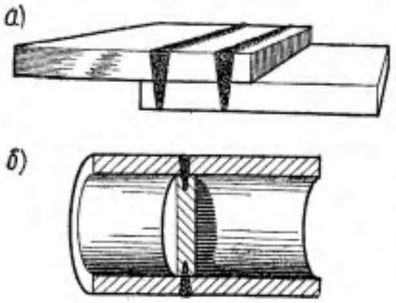


Рис. 3.25. Соединения при электронно-лучевой сварке:
а — нахлесточное; *б* — тавровое

Сварка взрывом. Сварка взрывом является одним из новых процессов соединения разнородных и однородных металлов. Перспективно использование эффекта взрыва главным образом для получения двухслойных элементов и производства наплавок. Сварка взрывом очень производительна. При правильном технологическом процессе механические свойства оказываются стабильными и высокими.

Сварка лазером. За последние годы перспективы применения лазера для сварки значительно расширились. Создание лазеров высокой мощности позволяет сваривать элементы конструкции толщиной в десятки миллиметров. Ее особенности — предельно узкая зона термического влияния и малые величины остаточных деформаций. Имеются все основания считать лазерный процесс перспективным для сварки как тонкостенных, так и толстостенных изделий. Достигается кинжальное проплавление. Пластические свойства швов высокие, например шов из стали Ст3 выдерживает двукратный перегиб на 180°. Эффективно применение лазера для соединений закаленных сталей.

Твердотельная лазерная сварка успешно применяется для соединения малых толщин, преимущественно меньше

миллиметра, нередко в форме точек при высокой интенсивности энергии $10^8 \ldots 10^9$ Вт/см² в течение ничтожно малого промежутка времени.

Сварка на основе CO_2-лазеров используется для сварных соединений значительно больших толщин.

В СССР и за рубежом распространены в промышленности лазеры мощностью до 5 кВт, что позволяет легко сваривать стали и цветные сплавы толщиной до 5 мм и более. Комбинирование нескольких лазеров, а также лазера с дугой позволяет значительно увеличить толщину свариваемых деталей.

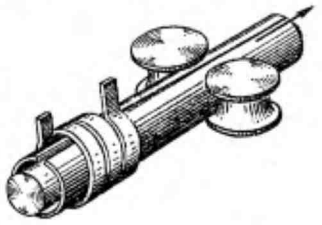


Рис. 3.26. Схема высокочастотной сварки с индукционным подводом тока

Имеются примеры лазерной сварки толстостенных изделий, но такие установки слишком дороги.

Радиочастотная сварка. Радиочастотная сварка (рис. 3.26) весьма производительна; ее скорость достигает 50 м/мин. Количество потребляемой энергии и температурное влияние ее на основной металл весьма незначительны. Радиочастотная сварка применяется для соединения не только стальных труб, но и труб из цветных металлов. При сварке латунных труб швы образуются так же, как и при обычной стыковой контактной сварке, но из-за большой скорости в процессе не происходит расплавления и испарения цинка в поверхностном слое. Этим способом можно сваривать профильный металл при небольшой толщине элементов.

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

Рассмотрим два примера расчета угловых швов, очерченных по равнобедренному треугольнику.

Пример 1. Швеллер № 12 (рис. 3.27, *а*) прикреплен к листу лобовым и фланговыми швами. Сварка ручная ($\beta=0{,}7$). Определить напряжения в швах при $P=180$ кН$=180\cdot10^{-3}$ МН.

Площадь сечения лобового шва, имеющего катет шва $K=5$ мм,

$$A_л = l\beta K = 12\cdot0{,}7\cdot0{,}5 = 4{,}2 \text{ см}^2.$$

Площадь сечения двух фланговых швов при $K=8$ мм

$$A_{фл} = 2\cdot20\cdot0{,}7\cdot0{,}8 = 22{,}4 \text{ см}^2.$$

Площадь сечения всех угловых швов прикрепления

$$A = A_л + A_{фл} = 26{,}6 \text{ см}^2 = 26{,}6\cdot10^{-4} \text{ м}^2.$$

Напряжение среза в швах

$$\tau = \frac{P}{A} = \frac{180 \cdot 10^{-3}}{26{,}6 \cdot 10^{-4}} = 67{,}7 \text{ МПа}.$$

Пример 2. Уголок 90×90 мм (рис. 3.27, *б*) имеет площадь сечения $A = 15{,}6$ см². Допускаемое напряжение в металле уголка $[\sigma]_р = 200$ МПа, допускаемое напряжение среза в шве $[\tau] = 120$ МПа.

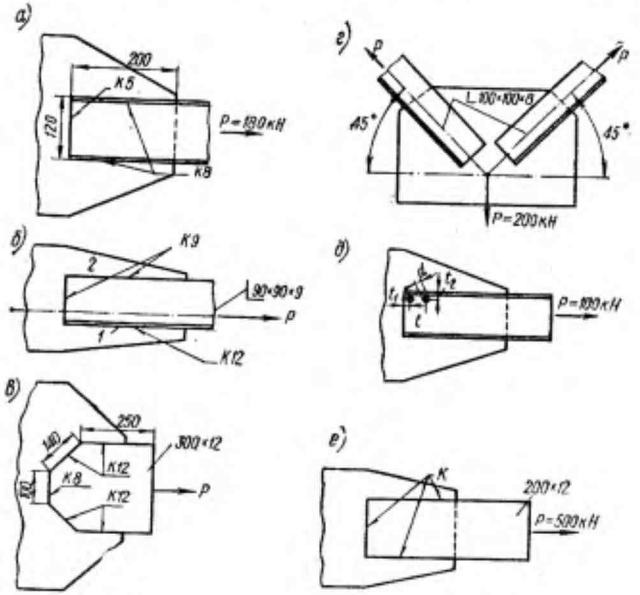


Рис. 3.27. Примеры расчета сварных соединений

Спроектируем сварное соединение, равнопрочное уголку; сварка однопроходная, полуавтоматическая ($\beta = 0{,}8$).

Допускаемое растягивающее усилие в уголке

$$P = [\sigma]_р A = 200 \cdot 15{,}6 \cdot 10^{-4} = 0{,}312 \text{ МН}.$$

Проектируем лобовой шов с катетом $K = 9$ мм.

Усилие, допускаемое на лобовой шов,

$$P_л = [\tau'] \beta l = 120 \cdot 0{,}8 \cdot 0{,}9 \cdot 9 \cdot 10^{-2} = 0{,}078 \text{ МН}.$$

Остальная часть усилия должна быть передана на фланговые швы:

$$P_{фл} = P - P_л = 0{,}234 \text{ МН}.$$

Усилие, передаваемое на шов *1*,

$$P_1 = 0{,}7 P_{фл} = 0{,}164 \text{ МН}.$$

Катет шва *1* принимаем $K = 12$ мм, тогда требуемая длина

$$l_1 = \frac{P_1}{\beta K [\tau']} = \frac{0{,}164}{0{,}8 \cdot 0{,}012 \cdot 120} = 0{,}142 \text{ м}.$$

Принимаем $l_1 = 14$ см.

Усилие, передаваемое на шов *2*,

$$P_2 = 0{,}3 P_{фл} = 0{,}67 \text{ МН}.$$

Катет шва *2* принимаем $K = 9$ мм, тогда требуемая длина

$$l_2 = \frac{P_2}{\beta K [\tau']} = \frac{0{,}67}{0{,}8 \cdot 0{,}009 \cdot 120} = 0{,}08 \text{ м}.$$

Принимаем $l_2 = 8$ см.

Примеры 3. . .6 предлагаются для самостоятельной работы по расчету угловых швов.

Пример 3. Полоса сечением 300×12 мм (рис. 3.27, *в*) прикреплена к листу фланговыми и косыми швами с катетами $K = 12$ мм и лобовым швом с катетом $K = 8$ мм. Определить допускаемое усилие P, если $[\tau'] = 120$ МПа, сварка автоматическая ($\beta = 1$).

Пример 4. Определить требуемые длины фланговых швов для прикрепления двух тяг уголкового профиля 100×100×8 мм (рис. 3.27, *г*). Площадь сечения тяги $A = 15{,}6$ см². Поддерживаемый груз $P = 200$ кН, сварка полуавтоматическая ($\beta = 0{,}8$).

Пример 5. Определить число сварных точек для прикрепления к листу швеллера № 6, 5 (рис. 3.27, *д*) площадью сечения $A = 8{,}28$ см² и толщиной стенки 4,5 мм при условии $P = 100$ кН с допускаемым напряжением на срез точки $[\tau'] = 90$ МПа и произвести их расстановку с учетом t, t_1, t_2.

Пример 6. Полоса сечением 200×12 мм (рис. 3.27, *е*) приваривается к листу. Усилие $P = 500$ кН; допускаемое напряжение шва $[\tau'] = 130$ МПа. Определить количество наплавленного металла при швах в форме равнобедренного треугольника с катетами $K8$ и $K12$ (сварка ручная ($\beta = 0{,}7$).

§ 3.6. СОЕДИНЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ ПЛАСТМАСС

Сварка горячим воздухом. При сварке воздух, нагретый на специальной горелке до 250. . .300 °С в зоне сварки, несколько охлаждается. Сварка осуществляется присадочным прутком, подающимся в разделку шва вручную или полуавтоматом.

Сварка нагревательным элементом. Данный способ позволяет сваривать угловые, тавровые и стыковые соединения. Одной из разновидностей данного способа является электроимпульсная сварка очень тонких пленок толщиной в сотые доли миллиметра. При этом узкая металлическая лента принимается к нахлестке соединяемых пленок, нагревается током и быстро охлаждается. Соединения обладают достаточной прочностью.

Сварка токами высокой частоты. Этим способом сваривают поливинилхлорид, полиамид и др. Разогрев соединяемых деталей производится роликами, через которые пропускается ток высокой частоты.

Сварка трением. Трением сваривают стыковые соединения, преимущественно тела вращения — стержни круглого сечения, трубы.

Сварка ультразвуком пластмасс является одним из прогрессивных способов их соединения. Она производится по схеме, приведенной на рис. 3.28. Колебания волновода

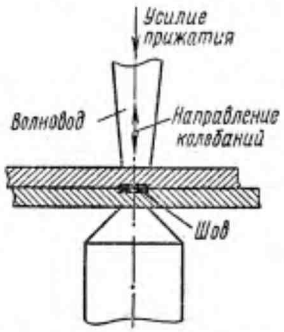


Рис. 3.28. Схема ультразвуковой сварки пластмасс



Рис. 3.29. Ультразвуковая сварка полимеров в труднодоступных местах

направлены перпендикулярно плоскостям стыкуемых элементов. Сварка обычно производится односторонним способом, но в некоторых случаях целесообразно расположение волноводов с двух сторон.

Ультразвуком можно сваривать тонкие пленки, а также детали толщиной в несколько миллиметров из различных термопластичных материалов: полистирола, полиэтилена, поливинилхлорида, винипласта и т. п. При ультразвуковой сварке получают нахлесточные и тавровые соединения.

Нахлесточные соединения при сварке ультразвуком могут быть точечными и шовными. Для постановки точек применяют различные системы волноводов, которые ставят сварные точки как по линии, так и по сложному контуру. При этом особенно хорошие результаты получаются при сварке контурными волноводами, имеющими в поперечном сечении круглый кольцевой профиль. Качество соединений, сваренных ультразвуком, определяется продолжительностью процесса, амплитудой колебаний волновода, усилием сдавливания. Ультразвуком можно сваривать несколько пластин, образующих пакет, а также производить сварку в труднодоступных местах (рис. 3.29).

Ультразвуком можно осуществлять сварку не только в месте соприкосновения волновода с деталью, но и на некотором расстоянии, которое зависит от свойств полимера и конфигурации конструкции, подлежащей сварке. Сварка ультразвуком широко применяется в различных отраслях промышленности.

В настоящее время с помощью ультразвука появилась возможность соединения биологических тканей (костей, мягких тканей).

§ 3.7. БОЛТОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Болтовые соединения применяются в конструкциях комбинированного характера. Часть соединений, выполненных в цеховых условиях, проектируется сварными, другая часть, выполняемая на монтаже,— с применением болтов. Как правило, эти болты имеют высокую прочность, изготовляются из сталей 40Х, 40ХФА, имеющих предел прочности при растяжении более 1000 МПа. Распределение усилий в сварном соединении с такими болтами происходит более равномерно, чем в сварном соединении с заклепками.

По точности изготовления болты разделяются на ряд групп повышенной точности согласно ГОСТ 15589—70. Болты устанавливаются диаметром $d=10...48$ мм при общей длине 40. . .200 мм.

Болты повышенной точности могут быть поставлены в отверстия с минимальным зазором 0,3. . .0,5 мм. Это обеспечивает передачу усилия в результате плотного соприкосновения болтов с деталями.

В некоторых случаях усилие передается посредством трения. При этом не требуется плотное соприкосновение тела болта со стенками отверстия и, следовательно, упрощаются сборочные операции.

В строительных конструкциях расчет болтовых соединений на срез определяется по формуле

$$\tau=\frac{P}{i\pi d^2/4}\leqslant R^{б}_{ср}, \qquad (3.29)$$

где i — число болтов; d — диаметр болтов; P — усилие.

Расчет на смятие производится по формуле

$$\sigma_{см}=\frac{P}{ids}\leqslant R^{б}_{см}, \qquad (3.30)$$

где s — наименьшая толщина соединяемых частиц.

Расчет на растяжение производится по формуле

$$\sigma^{б}_{р}=\frac{P}{i\pi d^2/4}<R^{б}_{р}. \qquad (3.31)$$

Расчетное сопротивление на срез в зависимости от марки стали принимается $R^б_{ср}=150...300$ МПа; на растяжение $R^б_р=170...400$ МПа; на смятие $R^б_{см}=380...470$ МПа.

Расчет высокопрочных болтов, работающих посредством трения, производится с учетом усилия натяжения болта:

$$P_б = 0{,}65\sigma^б_в A^б_н, \qquad (3.32)$$

где $\sigma^б_в$ — предел прочности болта; $A^б_н$ — площадь сечения болта по внутреннему диаметру.

Усилия, которые воспринимаются трением, составят

$$N = P_б f m, \qquad (3.33)$$

где $m=0{,}9$ — коэффициент условий работы; f — коэффициент трения.

При отсутствии обработки соединяемых поверхностей $f=0{,}25$; при обработке щетками $f=0{,}35$; при огневой обработке $f=0{,}40$.

Рабочие усилия, воспринимаемые болтом,

$$N = 0{,}65\sigma^б_в A^б_н f m. \qquad (3.34)$$

Применение высокопрочных болтов облегчает условия монтажа и нередко оказывается рациональным с позиций повышения работоспособности конструкции при действии переменных и ударных нагрузок.

Высокопрочные болты могут быть рекомендованы не только для стальных конструкций, но и для конструкций из алюминиевых сплавов, например АМг6, Д1Т, Д16Т и др. Применяют болты из сплавов АВТ1, В94, Д16 и пр.

Размещение болтов в конструкциях определяется следующими условиями: минимальное расстояние между центрами $3{,}5d$; максимальное расстояние между центрами в крайних рядах $5d$ или $10s$; то же, в средних $10d$ или $14s$; минимальное расстояние от центра болта до края элемента $2{,}5d$, максимальное $6s$.

Здесь d — внешний диаметр резьбы болта; s — наименьшая толщина соединяемых частей.

§ 3.8. КЛЕЕСВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Клеесварные нахлесточные соединения применяются в конструкциях из алюминиевых сплавов. Клеевая прослойка повышает сопротивляемость конструкции коррозии, а также воспринимает на себя часть усилия. Кроме того, клеевые прослойки способствуют устранению раскрытия нахлестки и смягчают концентрацию напряжения, повышая тем самым работоспособность конструкций. Сопоставление допускаемого усилия среза $P_{ср}$ клеесварных соединений со сварными и клепаными в зависимости от толщины s соединяемых элементов дано на рис. 3.30.

Прочность клеесварных соединений в бóльшей мере зависит от температуры эксплуатации, а также от технологических и конструктивных параметров, состава клея,

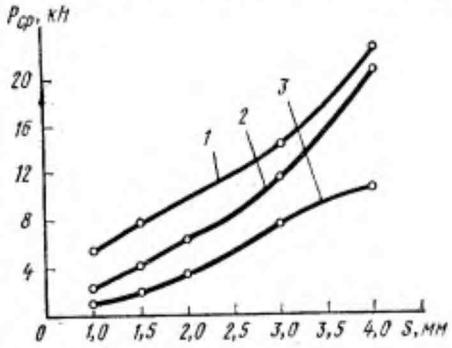


Рис. 3.30. Прочность клеесварных соединений:

1 — клеесварные соединения (клей ВК-1); *2* — сварные соединения; *3* — клепаные соединения

величины зазора, толщины деталей. Эффективность склеивания повышается с уменьшением толщины элементов.

Наилучшими в технических целях оказались модернизированные эпоксидные и кремнийорганические клеи.

В инструментальном производстве их использование на 30...40% снижает расход твердых сплавов и еще в бóльшей степени быстрорежущих сталей.

Прочность соединений определяется адгезией клея со склеиваемыми материалами, представляющей образование связей между приведенными в контакт и обжатыми материалами. Они разделяются на термопластичные, наиболее распространенные, переходящие после охлаждения в твердое состояние без изменения свойств на основе термореактивных смол для склеивания преимущественно неметаллических материалов.

Типы клеевых соединений приведены на рис. 3.31, *а*. Они требуют подготовки поверхностей без загрязнений, трещин и нанесения массы клея 100...300 г/м².

При склеивании неизбежно образование остаточных напряжений, возникающих в пленке при ее отверждении. Соединения испытываются нагружениями, а также нераз-

рушающими методами, например ультразвуком, резонансом (рис. 3.31, *б*).

Прочность клеевых соединений зависит от вида клея, его молекулярной массы, наполнителей, структуры и состояния поверхностей, стоимости в природных условиях, типа соединений, рода соединяемых материалов.

Стыковые соединения применяют при относительно больших контактируемых площадях; соединения внахлестку распространены особенно широко в промышленности.

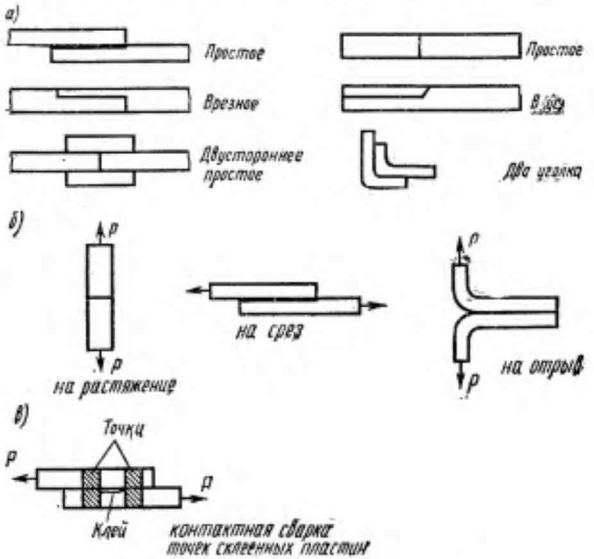


Рис. 3.31. Клеевые соединения:

а — типы клеевых соединений; *б* — методы испытания; *в* — клеесварные соединения (проклеивание + точечная контактная сварка)

В соединениях, работающих на отслаивание, прочность наиболее низкая.

Ниже приведены примеры прочности соединений с клеями высокого качества при склеивании разных металлов.

Прочность клеевых соединений на основе эпоксидных смол деталей при сдвиге следующая:

Ст3	30...40 МПа
Х3Н10	24...31 МПа
Д16	21...35 МПа
Латунь	17 МПа
Медь	16 МПа

Нередко применяют клеесварные соединения, например в комбинации с точечной сваркой. Проклеивание предохраняет соединение от раскрытия, уменьшает концентрацию напряжений и в некоторой степени принимает на себя усилие *P*. Пластины склеиваются, после чего производится сварка точек контактным способом (рис. 3.31, *в*).

§ 3.9. ПАЯНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Пайка осуществляется присадочным металлом, называемым припоем, имеющим температуру плавления более низкую, нежели металл соединяемых частей. Процесс

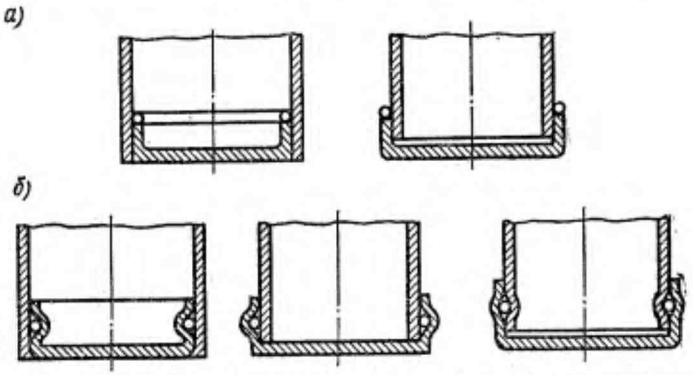


Рис. 3.32. Паяные соединения в трубах с плоскими и штампованными элементами:

а — внешнее расположение припоя; *б* — внутреннее расположение припоя

пайки универсален. Пайкой соединяют однородные и разнородные металлы, металл с графитом, керамикой и другими неметаллическими материалами.

На рис. 3.32, *а* показано положение деталей перед пайкой, которая происходит в результате затекания расплавленного припоя в зазор величиной в несколько десятых долей миллиметра.

На рис. 3.32, *б* изображены паяные соединения труб со штампованными элементами. Надлежащая прочность паяного соединения обеспечивается нахлесткой достаточно большой протяженности.

Рассмотренные примеры соединений выполняются капиллярной пайкой, которая наиболее распространена. Операцией, осложняющей применение этого вида пайки, является необходимость обеспечения тончайшего (доли

миллиметра) ровного зазора между спаиваемыми элементами.

Существуют и другие способы пайки, устраняющие указанное затруднение, например пайка в термической

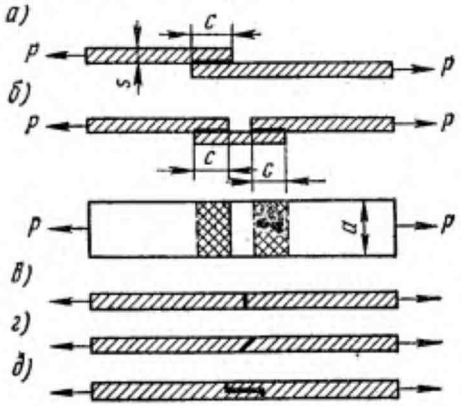


Рис. 3.33. Паяные соединения внахлестку (*а*, *б*) и встык (*в*, *г*, *д*)

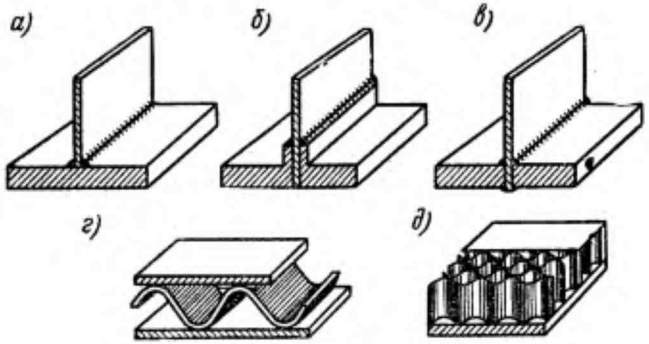


Рис. 3.34. Паяные соединения втавр:

а — менее прочные; *б*, *в* — более прочные; *г*, *д* — хорошо сопротивляющиеся изгибу и кручению

печи; термореактивная пайка, при которой в зазор укладывается пластинка припоя (под внешней приложенной силой и нагревом расплавляется и формирует паяный шов). Применяется также диффузионная пайка в вакууме при нагреве и сдавливании аналогично диффузионной.

Расчет прочности паяных соединений производится в зависимости от характера действующих сил. Если на соединения внахлестку (рис. 3.33, *а*, *б*) действуют продольные растягивающие или сжимающие усилия P, то паяные соединения работают на срез.

Напряжение по плоскости среза

$$\tau = \frac{P}{ca}[\tau'], \qquad (3.35)$$

где $[\tau']$ — допускаемое напряжение паяного шва на срез.

На рис. 3.33, *в*. . .*д* приведены примеры паяных соединений встык. Паяные прямые швы (рис. 3.33, *в*) не всегда могут быть рекомендованы для рабочих конструкций.

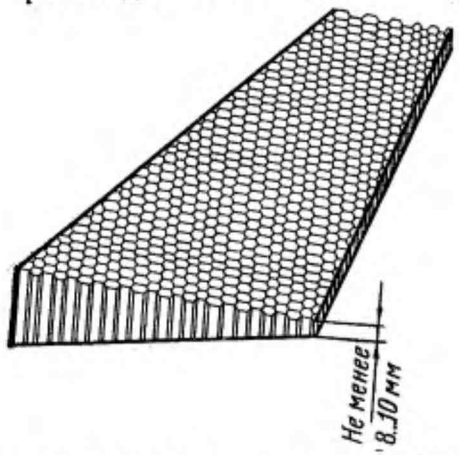


Рис. 3.35. Паяная сотовая конструкция

Косые паяные швы (рис. 3.33, *г*) обладают высокой несущей способностью, особенно при угле скоса 45°. Зигзагообразные соединения (рис. 3.33, *д*) не могут быть признаны целесообразными. Они сложны в оформлении, а разрушение наступает по сечению, совпадающему с вертикальной плоскостью спая.

Паяные тавровые соединения, изображенные на рис. 3.34, *а*, *б*, применяют главным образом в качестве связующих или малонапряженных в элементах, работающих на изгиб. Большей прочностью обладают тавровые соединения, изображенные на рис. 3.34, *в*.

Паяные соединения открывают возможность создания жестких и экономичных элементов, хорошо работающих на изгиб и кручение. Примеры таких соединений изображены на рис. 3.34, *г*, *д*. Соединительные элементы впаиваются между двумя плоскостями. Паяные сотовые конструкции (рис. 3.35) обладают жесткостью, небольшой массой, компактностью.

§ 3.10. ОБОЗНАЧЕНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ЧЕРТЕЖАХ

Сварные соединения обозначаются по ГОСТ 2.312—72. Шов сварного соединения изображают на чертеже: видимый — сплошной основной линией, невидимый — штриховой линией. От изображения шва проводят линию-выноску с односторонней стрелкой, указывающей место расположения шва.

На чертежах поперечных сечений границы шва изображают сплошными основными линиями, а конструктивные элементы кромок в границах шва — сплошными тонкими линиями. Вспомогательные знаки для обозначения сварных швов приведены в табл. 3.6.

Обозначения сварных швов наносятся над полкой линии-выноски в случае лицевой стороны шва и под полкой — для обратной стороны шва. Эти обозначения имеют следующие элементы:

обозначение стандарта на типы и конструктивные элементы швов сварных соединений (см. табл. 3.7, столбец 1);

буквенно-цифровые обозначения по стандарту (см. табл. 3.7, столбец 5);

условное обозначение способа сварки;

знаки профиля шва и его катета для швов угловых, тавровых и нахлесточных соединений;

длина и расположение участков прерывистого шва;

вспомогательные знаки (см. табл. 3.6).

Стыковое соединение обозначается С; угловое — У; тавровое — Т; нахлесточное — Н; если форма шва не предусмотрена ГОСТом — О (особый).

Цифры возле букв, например С25, Т4, указывают порядковый номер данного шва в ГОСТе (вид соединения и шва, а также форму разделки кромок и размеры соединения в сборе).

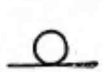
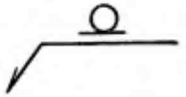
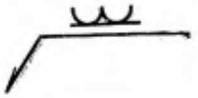
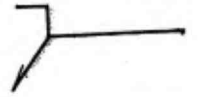
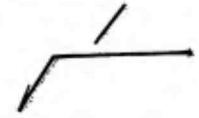
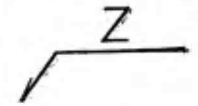
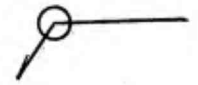
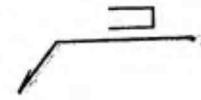
Дуговая сварка обозначается Э; газовая — Г; электрошлаковая — Ш; в инертных газах — И; ультразвуковая — Уз; трением — Тр; холодная — Х; диффузионная — Дф; контактная — К; электронно-лучевая — Эл; лазерная — Лз; взрывом — Вз; плазменная — Пз; в углекислом газе — У.

Буквы перед обозначением вида сварки обозначают: Р — ручная А — автоматическая П — полуавтоматическая.

Для автоматической сварки приняты следующие обозначения: автоматическая сварка под флюсом без приме-

Таблица 3.6

Условные обозначения сварных соединений

Вспомогательный знак	Значение вспомогательного знака	Расположение вспомогательного знака
	Усиление шва снять	
	Наплывы и неровности шва обработать с плавным переходом к основному металлу	
	Монтажный шов	
	Шов прерывистый или точечный с цепным расположением участков	
	То же, с шахматным расположением участков	
	Шов по замкнутой линии	
	Шов по незамкнутой линии	

нения подкладок и подварочного шва — А; автоматическая сварка под флюсом на флюсовой подушке — Аф; автоматическая сварка под флюсом на стальной подкладке — Ас; автоматическая сварка под флюсом на флюсовой подкладке — Ам; автоматическая сварка под флюсом с предварительным наложением подварочного шва — Апш; автоматическая сварка под флюсом с предварительной подваркой корня шва — Апк.

Те же индексы используются при указании технологических особенностей полуавтоматической сварки (П, Пф, Пс и т. д.).

Для контактной сварки применяют следующие обозначения с индексами, отмечающими ее отдельные разновидности: Кр — шовная; Кс — стыковая; Ксс — стыковая

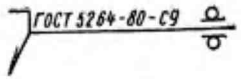
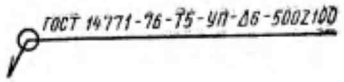
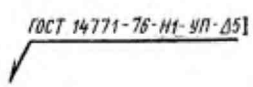
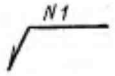
Таблица 3.7

Типы швов сварных соединений и их условные обозначения

ГОСТ	Вид сварки	Вид соединения	Пределы толщины свариваемых деталей, мм	Условные обозначения швов
5264—80	Ручная дуговая	Стыковое Тавровое Нахлесточное Угловое	1...100 2...100 2...60 1...50	С1-С25 Т1-Т11 Н1-Н3 У1-У10
8713—79	Автоматическая и полуавтоматическая под флюсом	Стыковое Тавровое Нахлесточное Угловое	1,5...160 3...60 1...40 1,5...40	С1-С34 Т1-Т13 Н1-Н6 У1-У10
14771—76	В защитных газах	Стыковое Тавровое Нахлесточное Угловое	0,5...120 0,8...100 0,8...60 0,5...100	С1-С28 Т1-Т10 Н1-Н2 У1-У10
15164—78	Электрошлаковая	Стыковое Тавровое	16...800 16...500	С1-С3 Т1-Т3
14776—79	Проплавное пробочное	Нахлесточное	0,5...22	Н1-Н6
15878—79	Контактная	Стыковое Нахлесточное	— 0,3,,,6	С1-С4 Н1-Н8

Таблица 3.8

Примеры условных обозначений сварных швов

Наименование шва	Пример обозначения
Шов стыкового соединения с криволинейным скосом одной кромки, двусторонний, выполненный дуговой ручной сваркой на монтаже изделия. Усилие снято с обеих сторон	
Шов таврового соединения без скоса кромок, двусторонний, прерывистый с шахматным расположением, выполняемый электродуговой ручной сваркой в защитных газах плавящимся металлическим электродом по замкнутой линии. Катет шва 6 мм. Длина привариваемого участка 50 мм, шаг 100 мм	
Шов соединения внахлестку без скоса кромок, односторонний, выполняемый электродуговой полуавтоматической сваркой в защитных газах плавящимся электродом. Шов по замкнутой линии. Катет шва 5 мм	
Упрощенное изображение одинаковых швов при условии полного обозначения одного из них	
То же, если все швы на чертеже одинаковые	

сопротивлением; Ксо — стыковая сплавлением; Кт — точечная.

Буквенные обозначения дуговой сварки и ручной дуговой сварки на чертежах не проставляют. Буквенные обозначения других способов сварки проставляют на чертежах только в случае применения нескольких способов.

При использовании одного способа сварки его указывают в технических требованиях на чертеже.

Условные обозначения швов сварных соединений установлены государственными стандартами.

В условных обозначениях швов допускаются следующие упрощения:

при наличии на чертеже швов, выполняемых по одному и тому же стандарту, обозначение стандарта указывают только в технических требованиях чертежа;

при наличии на чертеже одинаковых швов обозначение на линии-выноске наносят у одного из них, а для остальных швов, имеющих одинаковый номер, на полке линии-выноски указывают только номер шва. Если же на чертеже все швы одинаковы, то допускается изображать их линиями-выносками без полок;

допускается не отмечать на чертеже швы линиями-выносками, а приводить указания по сварке записью в технических требованиях чертежа, если эта запись однозначно определяет места сварки, способы сварки, типы швов и размеры конструктивных элементов. Примеры условных обозначений приведены в табл. 3.8.

§ 3.11. МЕХАНИЧЕСКАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, МЯГКАЯ ПРОСЛОЙКА. КОМПОЗИТНЫЕ ШВЫ

Существует много стандартных методов определения механических свойств металлов. Это испытания на растяжение, испытания гладких образцов на статический изгиб

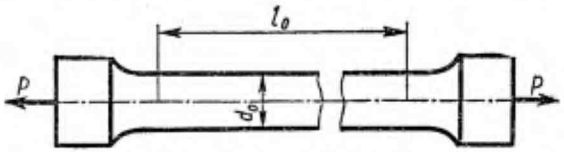


Рис. 3.36. Пример образца для испытаний на статическое растяжение при нормальной или пониженной температуре

и надрезанных образцов на ударный изгиб, определение твердости металла, испытание на длительную прочность и др. Бóльшая часть этих испытаний может быть применена для оценки механических свойств металла шва, термического влияния зоны или даже сварного соединения (табл. 3.9).

В испытаниях на статическое растяжение (рис. 3.36) определяют предел текучести $\sigma_т$, предел прочности $\sigma_в$,

Таблица 3.9

Механические свойства наплавленного металла и стыковых сварных соединений

Тип электрода	Механические свойства металла шва или наплавленного металла при применении электродов диаметром более 2,5 мм			Механические свойства сварного соединения при применении электродов диаметром 2,5 мм и менее	
	временное сопротивление разрыву $\sigma_в$, МПа	относительное удлинение δ_5, %	ударная вязкость $a_н$, МДж/м²	временное сопротивление разрыву $\sigma_в$, МПа	угол загиба α, град
	не менее			не менее	
Э34	340	—	—	340	30
Э42	420	18	0,8	420	120
Э42А	420	22	1,4	420	180
Э46	460	18	0,8	460	120
Э46А	460	22	1,4	460	150
Э50	500	16	0,6	500	90
Э50А	500	20	1,3	500	150
Э55	550	20	1,2	550	140
Э60	600	16	0,6		
Э60А	600	18	1,0		
Э70	700	12	0,6		
Э85	850	12	0,5		
Э100	1000	10	0,5		
Э125	1250	6	0,4		
Э145	1450	5	0,4		

относительное удлинение после разрыва δ_5 на образцах, рабочая длина которых l_0 в пять раз больше диаметра d_0, относительное сужение после разрыва ψ. Образцы изготовляют из металла шва, участков зоны термического влияния или наплавленного металла. Отбор образцов ведут либо непосредственно из конструкции, либо из специально сваренных соединений. Такие образцы используются для испытаний при нормальной и пониженной температурах.

Для определения сопротивляемости металла разрушению при ударных нагрузках в присутствии концентратора проводят испытания на ударный изгиб надрезанных образцов (рис. 3.37). Определяют так называемую ударную вязкость $a_н$ металла шва, зоны термического влияния в различных участках и наплавленного металла. Надрез располагают в том месте, где необходимо определить данные свойства. Используют надрезы различной остроты. Чем острее надрез, тем меньше работа, затрачиваемая на

изгиб до появления трещины, и тем больше работа, идущая на распространение трещины по образцу:

$$a_н = W/A,$$

где W — работа, идущая на ударный излом образца; A — площадь поперечного сечения в зоне надреза.

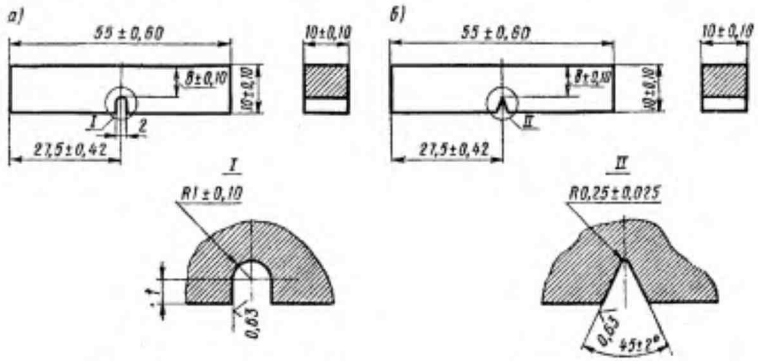


Рис. 3.37. Образцы для испытаний на ударный изгиб:
а — тупой надрез; *б* — острый надрез

Сварное стыковое соединение в поперечном сечении имеет несколько участков, которые могут существенно различаться между собой по механическим свойствам (рис. 3.38). Это сам шов *1*; зона термического влияния *2*, материал которой у ряда сталей претерпевает структурные превращения и может иметь повышенную твердость и прочность зона высокого отпуска *3*, в которой у термически обработанных сталей прочность и твердость понижены в результате сварочного нагрева. Далее следует зона *4*, нагревающаяся до более низких температур, материал которой по-разному изменяет свои свойства в зависимости от марки стали или сплава.

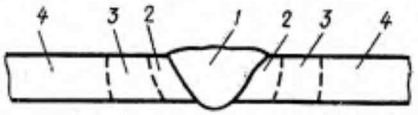


Рис. 3.38. Стыковое сварное соединение

Случай неоднородности имеет место при стыковой сварке наклепанных сталей и сплавов, аустенитных сталей или алюминиевых сплавов, которые упрочнены холодной прокаткой. Нагрев до высоких температур снимает наклеп, достигнутый при холодной прокатке металла. На рис. 3.39 показано распределение твердости в сварном

соединении из сплава АМг6. Твердость шва зоны термического влияния близка к твердости отожженного металла. Предел прочности и предел текучести оказываются заметно ниже, чем у основного металла, а пластичность повышается.

Зоны, где металл обладает пониженным пределом текучести по отношению к пределу текучести соседнего металла, называют мягкими прослойками.

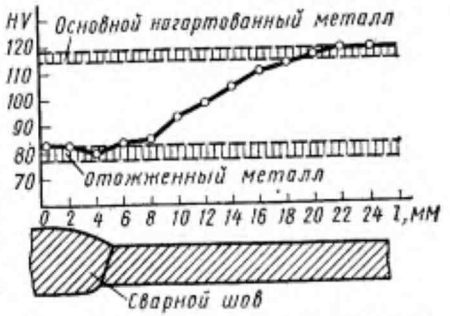


Рис. 3.39. Распределение твердости по Виккерсу сварного шва из сплава АМг6 (s=2,8 мм)

Паяные стыковые соединения, припой в которых менее прочен, чем основной металл, также содержат мягкую прослойку. Прочность таких соединений зависит не только от прочности металла мягкой зоны, но и от ее относительного размера h/s, где h — ширина прослойки, s — толщина металла.

Другим типичным примером образования механической неоднородности и прослоек является сварка термически обработанных сталей. Будем для простоты рассматривать

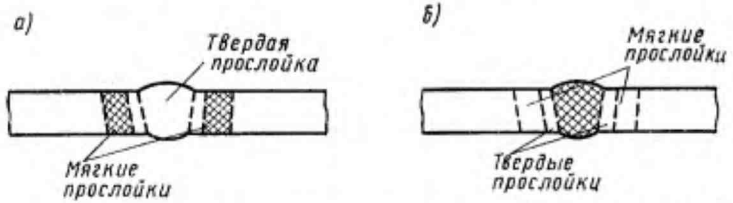


Рис. 3.40. Твердые и мягкие прослойки в сварных соединениях

сварку без присадочного металла. Тогда шов и зона термического влияния, нагретые до температуры выше T_{c_3}, в процессе охлаждения закаливаются и имеют более высокую твердость и прочность, чем основной металл. Этот участок называют твердой прослойкой (рис. 3.40, *а*, *б*). Рядом с ней в обе стороны находятся участки высокоотпущенного металла, который и по отношению к основному, и по отношению к твердой прослойке имеет пониженный предел текучести. Эти зоны образуют две мягкие прослойки.

Рассмотрим работу мягкой прослойки при растяжении стыкового соединения поперек шва достаточно большой протяженности за плоскость чертежа (рис. 3.41). В упругой стадии нагружения мягкая прослойка и соседние с ней участки деформируются однородно, и при достижении предела текучести материала мягкой прослойки $\sigma_{т_\mu}$ в ней возникает пластическая деформация, в то время как соседние участки остаются в упругом состоянии. При дальнейшем повышении нагрузки и деформации коэффициент поперечной деформации μ у прослойки будет выше, чем у соседнего металла. По мере развития пластической деформации в прослойке $\mu \to 0{,}5$, в то время как в упругих частях $\mu = 0{,}3$. Из-за неодинаковой поперечной деформации возникают касательные напряжения, имеющие максимальные значения на плоскостях раздела. Они будут препятствовать поперечному сужению прослойки в направлении толщины листа. Чем прослойка у́же, т. е. меньше отношение h/s, тем меньшее поперечное сужение получает прослойка к моменту возникновения разрушающих напряжений $\sigma_{разр}$. В более узких мягких прослойках площадь утоненного поперечного сечения прослойки $A_{утон}$ к моменту разрушения будет больше, а следовательно, будет больше и разру́шающая сила $P_{разр}$.

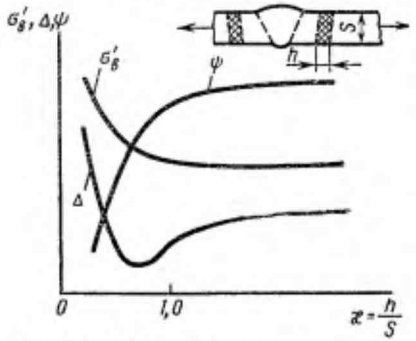


Рис. 3.41. Зависимость $\sigma_в$, ψ и Δ от относительной толщины прослойки

В этом заключается причина повышения несущей способности (эффект контактного упрочнения). Повышение разрушающей силы не может происходить беспредельно, так как соседние с мягкой прослойкой и более прочные участки также при определенных условиях начнут пластически деформироваться. Чем прочнее соседние зоны, тем больше эффект контактного упрочнения. Твердые прослойки, находящиеся рядом с мягкими, усиливают этот эффект.

Мягкие прослойки могут образовываться не только в зонах термического влияния. При сварке толстостенных изделий мягкие прослойки образуются в толще самих швов. Толщина, направление и расположение указанных прослоек могут регулироваться технологическими приемами.

Наличие мягких прослоек в шве может повысить его несущую способность за счет образования в них пластических деформаций и перераспределения поля напряжений.

Освещение вопроса о мягких прослойках получено в научно-педагогической школе проф. О. А. Бакши Челябинского политехнического института (ЧПИ) и используется при разработке технологических процессов сварки.

Одним из видов неоднородности механических свойств металла является а н и з о т р о п и я, которая выражается в различии свойств металла при нагружении его в разных направлениях. Различными могут быть пластичность, ударная вязкость, коэффициент поперечной деформации, модуль упругости и другие свойства. Анизотропия металла возникает чаще всего во время прокатки. Прочность, пластичность, ударная вязкость, как правило, выше у образцов, вырезанных вдоль проката. Во время разрушения трещина, пересекая волокна, встречает большее сопротивление, чем двигаясь вдоль волокон. Особенно низкими бывают прочность и пластичность металла по толщине листа. При наличии расслоений в металле пластичность отдельных образцов в этом направлении близка к нулю.

Во время термической резки или сварки, если усадка металла происходит в направлении толщины листа, в зоне расслоений появляются трещины. Передача растягивающих усилий в направлении толщины может предусматриваться при проектировании сварных конструкций лишь в тех случаях, когда есть полная уверенность, что используемый металл не склонен к образованию расслоений, а механические свойства в направлении толщины соответствуют уровню, предусмотренному техническими требованиями.

Анизотропия может выражаться в различном сопротивлении металла пластической деформации, различном упрочнении и, как следствие, в различных коэффициентах поперечной деформации.

В стыковых соединениях при пайке также реализуется эффект контактного упрочнения. Концентрация касательных напряжений создает объемное напряженное состояние. При достаточной пластичности припоя это приводит к повышению прочности соединения и может рассматриваться как положительный эффект.

При дальнейшем увеличении толщины прослойки прочность падает. В нахлесточных соединениях при статиче-

ских нагрузках пластичность обычно применяемых припоев оказывается достаточной, чтобы воспринять концентрацию касательных напряжений и сдвиговых деформаций без разрушения спая при величине нахлестки, достаточной для получения паяного соединения, равнопрочного основному металлу.

Свойства сварных соединений зависят от металла шва и свойств различных зон термического влияния. Для подавляющего большинства сталей удается получить такой химический состав металла шва и его структуру, которые обеспечивают прочность и пластичность металла шва во многих случаях выше тех же характеристик основного металла. Как правило, этого удается достигнуть непосредственно после сварки, а иногда — после термической обработки сварных конструкций. Свойства зоны термического влияния в основном зависят от реакции основного металла на термический цикл сварки.

Существуют определенные возможности за счет регулирования термического воздействия сварки получить свойства зоны термического влияния, обеспечивающие равнопрочность и достаточную пластичность сварного соединения.

Отрицательное влияние термического цикла на зону термического влияния может проявляться в росте зерна вблизи линии сплавления, понижении пластичности металла в зоне, испытавшей перекристаллизацию, понижении прочности в зоне высокого отпуска, если основной металл перед сваркой находился в термически обработанном состоянии. Степень указанных воздействий может меняться в зависимости от термического цикла сварки, химического состава стали и ее термической обработки до сварки.

Получить равнопрочные сварные соединения из алюминиевых, магниевых и титановых сплавов сложнее, чем из сталей. Во многих случаях соединения из этих сплавов оказываются неравнопрочными с основным металлом.

Для сплавов невысокой прочности, а также для сплавов, находящихся в ненаклепанном состоянии, предел прочности сварных соединений приближается к пределу прочности основного металла.

В алюминиевых сплавах, которые в исходном состоянии термически упрочнены, соединения после сварки существенно уступают по прочности основному металлу. Термической обработкой и старением удается заметно повысить прочность сварных соединений и приблизиться к уровню прочности основного металла.

Большинство алюминиевых сплавов хорошо свариваются контактной сваркой. Современное оборудование и технология обеспечивают соединение деталей из алюминиевых сплавов малой и средней толщины. Прочность на отрыв

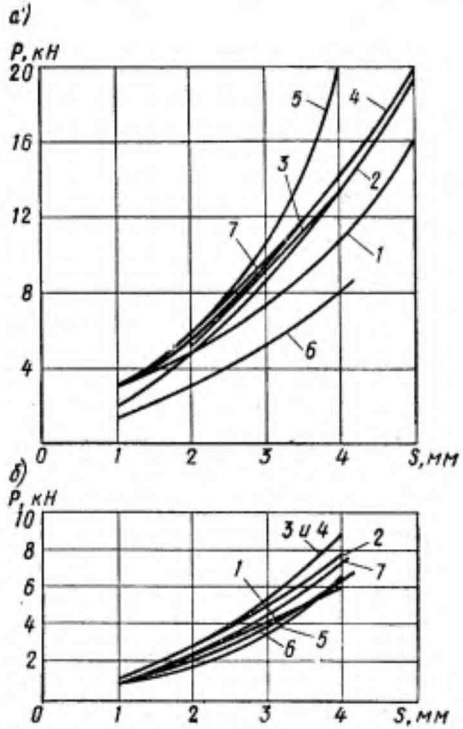


Рис. 3.42. Разрушающие усилия P на срез ($а$) и на отрыв ($б$) для сварных точечных соединений в зависимости от толщины металла s:
1 — АМц; *2* — АМг3; *3* — АМг5; *4* — АМг6; *5* — АМг6l; *6* — Д16АМ, Д20АМ; *7* — Д16АТ, В95Т1

из-за высокой концентрации напряжений заметно ниже прочности на срезе (рис. 3.42).

Пределы прочности титановых сплавов в зависимости от легирования и термической обработки колеблются в пределах 500. . .1300 МПа. Для большинства титановых сплавов средней прочности характерна относительно невысокая пластичность по углу загиба ($\alpha<80. . .100°$) и относительному удлинению ($\delta_5=8. . .15\%$).

В последние два десятилетия для оценки прочности металлов при наличии в них трещин применяют положения линейной механики разрушения. Она оперирует с концентраторами, у которых $r=0$. В этом случае расчетное механическое напряжение становится равным бесконечности, а понятие коэффициента концентрации напряжений

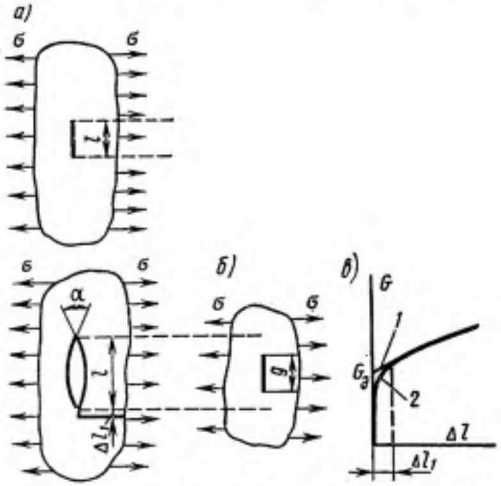


Рис. 3.43. Бесконечная пластина с надрезами ($\rho=0$):
а — трещина с $\alpha=0$; *б* — вырез с $\alpha\neq0$; *в* — изменение G

теряет смысл. Для оценки поля напряжений вблизи концентратора используют понятие коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины при упругих деформациях (K_{1c}) и понятие интенсивности освобождения энергии деформации, обозначаемой G.

Рассмотрим тонкую бесконечную пластину (плоское напряженное состояние), растянутую напряжениями σ, имеющую разрез в виде трещины $\alpha=0$ (рис. 3.43, *а*) и в виде выреза с $\alpha\neq0$ (рис. 3.43, *б*).

Для трещины длиной l в бесконечной пластине формула коэффициента интенсивности напряжений имеет вид

$$K=\sqrt{\frac{\pi}{2}}\,\sigma\sqrt{l}; \qquad (3.36)$$

для интенсивности освобождения энергии

$$G=\frac{\pi\sigma^2 l}{2E}. \qquad (3.37)$$

Величина K характеризует распределение напряжений у конца трещины и выражается в $Н/м^{3/2}$, а величина G — это энергия, освобождающаяся в растянутой пластине при возможном подрастании трещины на единицу площади, выражаемая в $Дж/м^2$. Обе эти величины взаимосвязаны: в случае плоского напряженного состояния

$$G=K^2E; \qquad (3.38)$$

при плоской деформации

$$G=(1-\mu^2)K^2E. \qquad (3.39)$$

В качестве характеристики напряженно-деформированного состояния используют также понятие раскрытия вершины концентратора δ.

Появление трещин в концентраторе. Наиболее распространенной характеристикой оценки прочности металла, сварного соединения или детали в присутствии концентратора является среднее разрушающее напряжение σ, определяемое в случае растяжения и среза отношением разрушающего момента $M_р$ к моменту сопротивления при изгибе W ($M_р/W$) или отношением разрушающей силы P к площади ослабленного сечения A. Однако оценка свойств только по среднему напряжению часто не обнаруживает отрицательного влияния концентратора, пока он не превысит некоторого значения.

При увеличении размера непровара или ухудшения свойств металла среднее разрушающее напряжение σ будет уменьшаться.

Начало движения имеющейся трещины. При растяжении бесконечной пластины длиной l трещина начинает распространяться после того, как напряжение σ достигло определенного (критического) уровня, при котором соблюдается равенство приращений работы, поглощаемой на разрушение металла, и энергии упругих деформаций пластины, освобождающейся при увеличении трещины. Впервые указанное энергетическое условие для идеализированной схемы разрушения рассмотрел Гриффинтс. Тело предполагается идеально хрупким, т. е. энергия расходуется на образование новой поверхности (поверхностного натяжения).

Если в сплошной растянутой пластине толщиной, равной единице, образовать трещину длиной l, то потенциальная энергия в пластине уменьшится на

$$U=\pi l^2\sigma^2/(4E). \qquad (3.40)$$

Появление новых поверхностей сопровождается затратами энергии

$$U_{\text{пов}} = -Gl, \tag{3.41}$$

где G — энергия поверхностного натяжения.

Суммарное изменение энергии составит

$$U_{\Sigma} = \frac{\pi l^2 \sigma^2}{4E} - Gl. \tag{3.42}$$

Если энергия будет освобождаться больше, чем поглощаться, трещина начнет самопроизвольно двигаться без увеличения напряжения. Это соответствует моменту равенства приращений энергии, т. е.

$$\frac{dU_{\Sigma}}{dl} = 0. \tag{3.43}$$

Дифференцируя (3.42), получим

$$\frac{\pi l \sigma^2}{2E} - G = 0. \tag{3.44}$$

Отсюда формулы для критического напряжения и критической длины трещины:

$$\sigma_{\text{кр}} = \sqrt{2GE/\pi l}; \tag{3.45}$$

$$l_{\text{кр}} = \frac{2GE}{\pi \sigma^2}. \tag{3.46}$$

Из (3.46) также получим критическое значение энергии:

$$G = \frac{\pi l_{\text{кр}} \sigma^2}{2E}. \tag{3.47}$$

Таким образом, при испытании образца в виде пластины с трещиной достаточно зарегистрировать значение напряжения в момент начала движения трещины, чтобы вычислить затем по формуле (3.47) характеристику металла G_c.

Для оценки свойств металла используют также критическое значение коэффициента интенсивности напряжений K_c, т. е. силовую характеристику, связанную с полем напряжений у концов трещины:

$$K_c = \sqrt{G_c E}. \tag{3.48}$$

С учетом (3.47) получим

$$K_c = \sigma \sqrt{\frac{\pi l}{2}}. \tag{3.49}$$

В качестве характеристики сопротивляемости металла началу движения трещины используют также деформационный критерий δ_c, критическое раскрытие трещины, которое соответствует раскрытию в момент начала движения трещины.

В других случаях, для определения работы распространения трещины в элементах конструкций, применяют метод тепловой волны, основанный на том, что более 95% работы, истраченной на распространение трещины, идет на пластическую деформацию и превращается в теплоту.

Для оценки сопротивляемости металла движению трещины используют также различные неэнергетические характеристики: волокнистость излома, скорость распространения трещины.

При циклических нагрузках регистрируют число циклов и путь, пройденный трещиной. Скорость распространения трещины dl/dN (мм/цикл) зависит от размаха интенсивности напряжений ΔK в пределах цикла, в меньшей степени — от абсолютного уровня K и частоты нагружений. Значение dl/dN изменяется в весьма широких пределах: от нуля при малых значениях K до 10^{-3} мм/цикл и более.

Проблема влияния дефектов на прочность сварных соединений крайне сложна и многопланова. Решить ее можно, учитывая условия эксплуатации, характер дефекта и свойства металла сварного соединения. Поэтому исследования в области влияния дефектов на прочность группируются вокруг отдельных вопросов. Например, в особые направления выделяются вопросы влияния дефектов при переменных нагрузках, в условии коррозии, при низких температурах и т. д.; в зависимости от вида дефекта рассматривается влияние трещин, непроваров, пор, смещений, мест перехода от направленного металла к основному и т. п.; проводят исследования различных материалов: высокопрочных сталей, алюминиевых и титановых сплавов.

Наибольшее влияние дефекты оказывают при переменных нагрузках (см. ниже гл. 4). Вопрос о влиянии дефектов на прочность в большинстве случаев сводится к вопросу о чувствительности металла к концентрации напряжений.

Неоднородность свойств сварного шва может быть полезной.

Как уже было указано, при сварке элементов больших толщин образование мягких прослоек внутри швов повы-

шает в целом их пластические свойства и может предотвратить хрупкие разрушения.

Другим примером полезной неоднородности могут служить многослойные швы, уложенные из материалов с разными механическими свойствами. Хорошо, если присутствует материал с повышенными пластическими свойствами в глубине шва при относительно более твердом металле на его поверхности. В особенности рационально иметь пластические зоны в зонах концентраторов в корне стыковых и лобовых швов.

Анизотропия швов оправдывается требованием особых свойств, предъявляемым к поверхностным слоям, например коррозионной устойчивости.

Конечно, укладка композитных швов наиболее целесообразна при больших толщинах соединяемых изделий и размеров катетов угловых швов при непременном условии применения запрограммированной контролируемой автоматической сварки с наличием обратных связей.

Контрольные вопросы к главе 3

1. Какие факторы принимаются в учет при расчете по предельному состоянию строительных конструкций?
2. Какими коэффициентами связаны расчетные сопротивления с допускаемыми напряжениями?
3. В зависимости от каких факторов устанавливаются допускаемые напряжения в машиностроении?
4. Что называется основным допускаемым напряжением? Каковы его производные напряжения?
5. Как рассчитываются на прочность сварные швы в строительных металлоконструкциях?
6. Как назначаются допускаемые напряжения в сварных швах в машиностроении?
7. Какие допускаемые напряжения принимаются при расчете сварных соединений при контактной стыковой и точечной сварках?
8. Почему допускаемое напряжение является фактором технико-экономическим?
9. Записать формулу для расчетного усилия соединения при растяжении, сжатии, изгибе.
10. Какие напряжения в соединении называют рабочими, какие — связующими?
11. Приведите примеры соединений с рабочими и связующими напряжениями.
12. Какова величина связующих напряжений? Почему они не принимаются во внимание при учете прочности?
13. Какие основные типы сварных соединений применяют при электродуговой сварке?
14. Какие соединения называют сваренными встык? В чем разница подготовки кромок при применении автоматической сварки под флюсом и ручной?
15. Как изменяется подготовка кромок при сварке встык в зависимости от толщины элемента?

16. Какова формула при расчете соединений встык, работающих на продольные силы?
17. Почему за расчетную толщину принимают толщину основного металла при расчете соединений встык?
18. В чем состоит особенность расчета прочности соединений встык высокопрочных термически обработанных сталей?
19. Для чего при сварке встык предусматривают подкладки?
20. Какие швы называют угловыми?
21. Приведите примеры соединений с угловыми швами.
22. Каково конструктивное оформление углового шва?
23. Что называется лобовыми, фланговыми и косыми швами?
24. Почему расчет угловых швов производят на касательные напряжения?
25. Какие швы экономичнее в отношении количества наплавленного металла (более толстые или более тонкие) при работе на заданные условия?
26. Как определяют допускаемые усилия для комбинированного соединения?
27. Как проектируют комбинированное соединение с учетом заданного усилия и допускаемого напряжения в швах?
28. Как произвести расчет прочности прикрепления уголка?
29. Какие напряжения образуются во фланговых швах при работе соединения на продольную силу?
30. Какие типы швов применяют в соединениях втавр?
31. Как рассчитывают соединения втавр при продольно-растягивающих и сжимающих силах?
32. Какие существуют типы угловых соединений? Применяют ли угловые швы в рабочих соединениях?
33. Какие типы электрозаклепок применяют в конструкциях и как их рассчитывают?
34. Какие типы соединения применяют при аргонодуговой сварке? Как производят расчет их прочности?
35. Какие типы соединений применяют при контактной стыковой сварке?
36. То же, при контактной точечной сварке?
37. Каково соотношение между диаметром и толщиной листа в точечных соединениях?
38. Какова величина шага в точечных соединениях?
39. На каком расстоянии ставится точка от края листа?
40. Приведите пример многосрезной точки.
41. Как рассчитываются точки в соединении, работающем на продольные силы?
42. Какие типы соединений применяют при роликовой сварке?
43. Как производят расчет прочности шва при роликовой сварке?
44. Каковы типы соединений при сварке трением?
45. Каковы типы соединений при сварке электронным лучом?
46. Каковы типы соединений при сварке ультразвуком?
47. Какие существуют способы сварки полимеров?
48. Какие полимеры могут быть сварены?
49. Какова прочность соединений полимеров по отношению к прочности основного металла при сварке горячим воздухом?
50. В чем состоит процесс сварки полимеров горячим лезвием и высокой частотой?
51. Какое принципиальное отличие имеют процессы сварки ультразвуком металлов и полимеров?

52. Какие типы полимеров могут свариваться ультразвуком?
53. Какие способы подготовки соединений применяют в конструкциях из алюминиевых сплавов?
54. Какие виды сварки применяют в конструкциях из алюминиевых сплавов?
55. В каких конструкциях применяют алюминиевые сплавы?
56. Какие задачи стоят перед сваркой композитных материалов?
57. В чем принципиальное отличие пайки от сварки?
58. Каковы технологические трудности процесса пайки?
59. Приведите примеры паяных соединений, не свариваемых другими способами.
60. Какие показатели характеризуют механические свойства? Что означает буква Э в марках электродов?
61. Как распределяется твердость в сварных соединениях из алюминиевых сплавов?
62. Что называется мягкой прослойкой, в результате чего она появляется? Что такое твердая прослойка?
63. Какие явления имеют место при растяжении соединения, сваренного встык в зоне мягкой прослойки?
64. Представляют ли опасность мягкие прослойки?
65. В каких формах проявляется анизотропия в сварных соединениях?
66. Что представляет собой контактное упрочнение при пайке?
67. В чем сказывается отрицательное влияние термического цикла в зону термического влияния?
68. В каких условиях необходимо использование линейной механики разрушения?
69. Как пишется выражение коэффициента интенсивности напряжений? Какова его размерность и что он характеризует?
70. В чем состоит энергетическое условие для распространения трещины?
71. Какова роль поверхностного натяжения?
72. Что такое метод тепловой волны и для чего он используется?
73. Какие примеры вредной и полезной анизотропии можно указать применительно к прочности соединений?

ГЛАВА 4

КОНЦЕНТРАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ

§ 4.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ. УСЛОЖНЕНИЕ СХЕМЫ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВБЛИЗИ КОНЦЕНТРАТОРОВ

В сварных соединениях распределение напряжений неравномерно. Имеет место их концентрация, т. е. образование значительных напряжений на участках малой протяженности.

Рассмотрим предварительно распределение напряжений в пределах упругих деформаций на полосе шириной a, ослабленной круглым небольшим отверстием диаметром d (рис. 4.1, $а$).

Нормальные напряжения в поперечном сечении $A—A$ определяются формулой

$$\sigma' = \frac{\sigma}{2}\left[2 + \frac{d^2}{4y^2} + \frac{3d^4}{16y^4}\right]. \qquad (4.1)$$

При $y=\frac{d}{2}$, $\sigma'=3\sigma$, т. е. теоретический коэффициент концентрации $K_т=\frac{\sigma'}{\sigma}=3$. При $y=2d$, $\sigma'=1{,}04\sigma$, т. е. приближается к единице. В случае эллиптического отверстия (рис. 4.1, $б$) теоретический коэффициент концентрации напряжений в пределах упругих деформаций

$$K_т = 1 + \frac{2b}{c}. \qquad (4.2)$$

При $c \to 0$, $K_т \to \infty$. Это решение не точно, так как при малых значениях деформаций, вызванные внешними силами, оказывают существенное влияние на форму отверстия и формула (4.2) не выполняется.

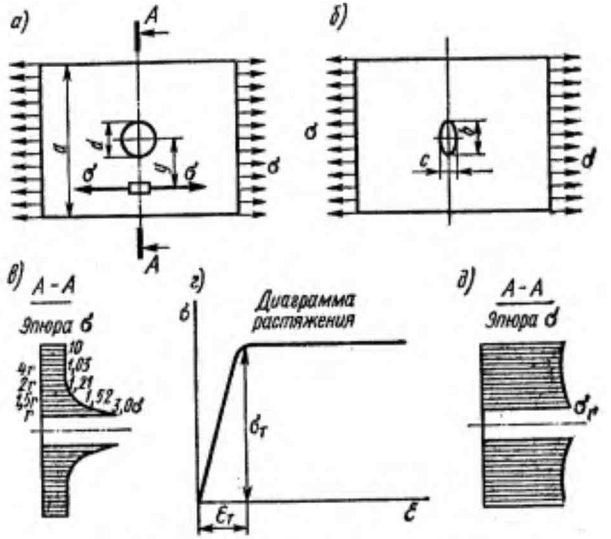


Рис. 4.1. Концентрация напряжений:
$а$ — в полосе с круглым отверстием; $б$ — в полосе с эллиптическим отверстием; $в$ — распределение σ в упругой стадии; $г$ — распределение σ в пластической стадии нагружения

Указанные местные напряжения в зоне концентрации не опасны для прочности в конструкциях из пластичных металлов при статических нагрузках. Поясним это положение.

Диаграммы растяжения пластичного металла нередко схематизируются. Их приближенно заменяют двумя прямыми: наклонной, выражающей зависимость напряжения от деформации в упругой области, и горизонтальной. Горизонтальная прямая показывает, что при $\varepsilon \to \varepsilon_т$ деформация протекает пластически, без увеличения нагрузки, приложенной к испытуемому элементу.

Вернемся к рассмотрению эпюры напряженной полосы, ослабленной отверстием (рис. 4.1, *в*). Напряженное состояние в сечении *А—А* близко к одноосному. Допустим, что около отверстия напряжение достигло значения $\sigma_т$. Это соответствует деформации $\varepsilon_т$. При увеличении нагрузки деформации возросли, но напряжения в зоне, где $\varepsilon > \varepsilon_т$ (рис. 4.1, *г*), как это следует из схематизированной диаграммы растяжения, остаются равными $\sigma_т$. Эпюра станет изменять свою форму и выравниваться. Приближенно можно принять, что она примет очертание, близкое к прямоугольному (рис. 4.1, *д*), что и было положено в основу расчета прочности по элементарным формулам.

Сглаживание эпюры напряжений в пластической стадии, рассмотренное на конкретном примере, является закономерным процессом, имеющим место во многих элементах конструкций из пластичных сталей (низкоуглеродистые и низколегированные) при одноосных напряженных состояниях (а иногда и многоосных). Однако концентрация напряжений существенно снижает прочность при переменных нагрузках; в случае ограниченной пластичности металла и при статических нагрузках.

§ 4.2. КОНЦЕНТРАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В СОЕДИНЕНИЯХ, ПОЛУЧЕННЫХ СВАРКОЙ ПЛАВЛЕНИЕМ

Концентрацию напряжений в сварных конструкциях вызывают следующие причины.

Технологические дефекты шва — газовые пузыри, шлаковые включения и особенно трещины и непровары. Возле этих дефектов при нагружении силовые линии искривляются, в результате чего образуется концентрация напряжений. Коэффициенты концентрации напряжений около указанных дефектов значительны, но при их небольшом числе и размерах прочность сварных

соединений остается удовлетворительной. В плотных однородных стыковых швах концентрация напряжений может быть сведена до минимума.

Нерациональные очертания швов. На основании данных теории упругости установлено, что очертание швов оказывает большое влияние на распределение в них внутренних сил. На металлических деталях и на моделях из прозрачного материала эти данные экспериментально подтверждены.

Нерациональные конструкции соединений. Примеры нерациональных конструкций соединений рассмотрены в следующих параграфах данной главы.

§ 4.3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В СТЫКОВЫХ ШВАХ

В стыковых соединениях с обработанными гладкими поверхностями швов, не имеющих внутренних дефектов (непроваров, трещин, пор, шлаковых включений), напряжения от продольной силы распределяются по попереч-

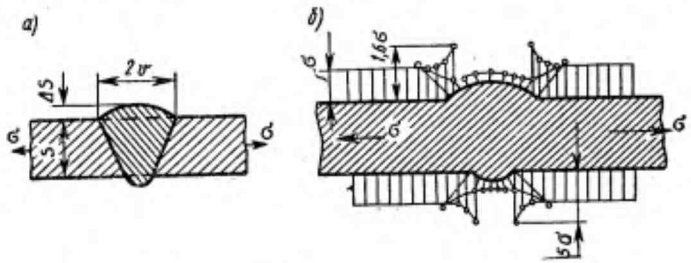


Рис. 4.2. Распределение напряжений в стыковом шве

ному сечению соединяемых элементов равномерно и определяются по формуле

$$\sigma = \frac{P}{ls}. \qquad (4.3)$$

Когда поверхность имеет форму, показанную на рис. 4.2, *а*, распределение напряжений по сечению становится неравномерным. На рис. 4.2, *б* показано распределение напряжений в стыковом соединении при $2\upsilon = 13$ мм и $\Delta s = 3$ мм (рис. 4.2, *а*). Зоны шва, сопрягаемые с основным металлом, испытывают концентрацию напряжений. Средние напряжения на оси шва несколько меньше напряжения в основном металле вне соединения.

Концентрация напряжений образуется также в корне шва при его непроваре.

Вторым источником концентрации может служить смещение одного элемента относительно другого (рис. 4.3, *а*, *б*), а также в результате местных деформаций, вызванных неравномерным сокращением шва.

Влияние концентраторов на прочность не учитывается при статических загружениях, но является весьма существенным при действии динамических нагрузок.

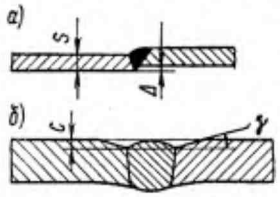


Рис. 4.3. Депланация (*а*) и изгиб стыкового шва (*б*)

Концентрация напряжений, вызванная очертанием шва, имеет место в зоне сопряжения шва с основным металлом, зависит от степени утолщения шва и радиуса перехода.

Концентрация резко возрастает при уменьшении радиуса до долей миллиметра.

Концентрация напряжений, возникающих в зоне пор, имеет пространственный характер. Как показывают теоретические расчеты, коэффициенты концентрации напряжений возле сферических пор в 1,5 раза меньше концентрации в зоне цилиндрических отверстий того же радиуса и положения относительно поверхности.

Стыковые швы при всех видах сварки — дуговой, контактной, электронно-лучевой — являются оптимальными в отношении концентрации напряжений. При доброкачественном технологическом процессе, отсутствии пор, непроваров, включений, смещении кромок, при доведении до минимума остаточных местных сварочных деформаций и, наконец, что особенно важно, при рациональном очертании швов, их плавных сопряжениях с основным металлом результирующий коэффициент концентрации напряжений может быть сведен до значений, близких к единице. В других типах соединений такой результат получить практически невозможно.

§ 4.4. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ЛОБОВЫХ ШВАХ

Изучение распределения напряжений в лобовых швах производилось теоретически — на основе положений теории упругости и пластичности и экспериментально — на моделях с применением поляризованного света, лаковых покрытий, тензометрирования. В последнее время развивается метод численного моделирования на ЭВМ, который позволяет получить наиболее полную информацию о напряженно-деформированном состоянии металла шва и в отличие от других расчетных методов достаточно хорошо согласуется с данными экспериментов. Эксперимент и последующий расчет подтвердили наличие значительной концентрации в лобовых швах и большое влияние на

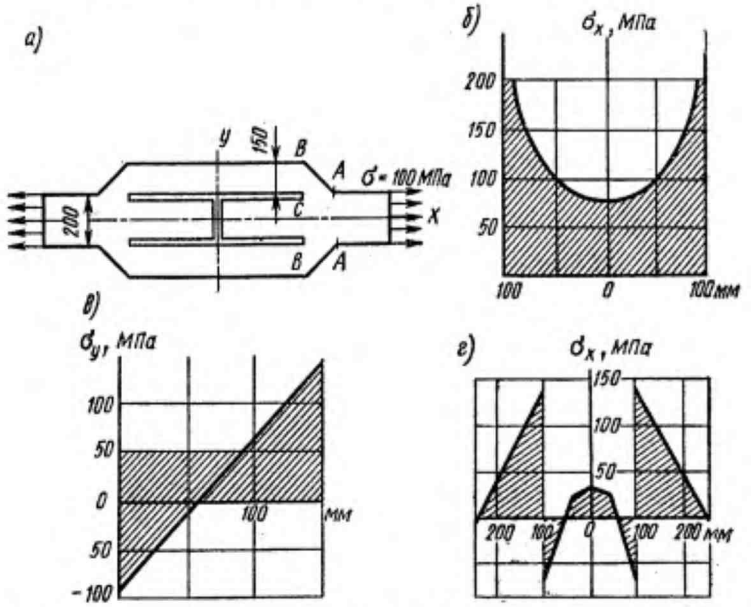


Рис. 4.4. Распределение напряжений в моделях соединений с двусторонними накладками

распределение напряжений конфигурации поперечного сечения шва: глубины проплавления, угла при вершине и формы свободной поверхности шва. Концентрация напряжений заметно снижается при увеличении глубины проплавления, увеличении угла и введении плавных переходов от шва к поверхности соединяемых деталей.

Расчеты на ЭВМ, проведенные в сварочной лаборатории МГТУ им. Н. Э. Баумана, показали, что при возрастании нагрузок происходит выравнивание деформаций и снижение концентрации напряжений.

Распределения напряжений в соединениях с лобовыми швами (рис. 4.4, *а*) показаны на рис. 4.4, *б* (*А*—*А*), на рис. 4.4, *в* (*С*—*А*) и на рис. 4.4, *г* (сечение *В*—*В*). Наи-

больший коэффициент концентрации $\alpha=2$ имеет место в сечении $A—A$ (рис. 4.4, *б*).

В нахлесточных соединениях с двумя лобовыми швами усилия между ними распределяются равномерно, в случае если элементы имеют равные толщины.

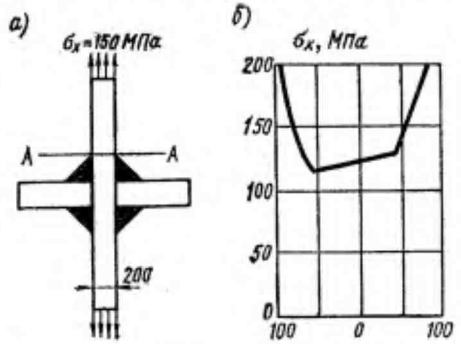


Рис. 4.5. Концентрация напряжений в тавровом сварном соединении

Концентрация напряжений имеет место также в лобовых швах тавровых соединений. Так, возле ребер жесткости, приваренных к растягиваемому элементу (рис. 4.5, *а*), образуется концентрация напряжений σ_x по сечению $A—A$. Эпюра этих напряжений показана на рис. 4.5, *б*.

Коэффициент концентрации напряжений в шве таврового соединения зависит от его очертания и от формы сопряжения с основным металлом.

§ 4.5. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В СОЕДИНЕНИЯХ С ФЛАНГОВЫМИ ШВАМИ

В соединениях с фланговыми швами имеет место концентрация напряжений в швах и в основном металле полос между швами.

Рассмотрим соединение двух полос, соединенных швами с катетом K длиной l (рис. 4.6). Ввиду незначительной ширины полос условно примем распределение напряжений σ в полосах равномерным по их ширине.

Основные элементы под действием растягивающих усилий удлиняются и перемещаются, во фланговых швах образуются сдвиговые деформации. Прямоугольный элемент dx шва *1—1—2—2* обращается в *1′—1″—2′—2″* (рис. 4.6, *а*). Наибольшие деформации наблюдаются в крайних точках шва, наименьшие — в средних. Поэтому касательные напряжения распределяются по длине шва неравномерно.

В соединениях, у которых площади поперечных сечений соединяемых деталей равны ($A_1=A_2=A$) (рис. 4.6, *б*), напряжение в точке шва определяется уравнением

$$\tau_x=\frac{\alpha P\,[\operatorname{ch}\alpha x+\operatorname{ch}\alpha\,(l-x)]}{4\beta K\operatorname{sh}\alpha l}, \qquad (4.4)$$

где

$$\alpha=\sqrt{4G/EA}; \qquad (4.5)$$

G — модуль сдвига; E — модуль упругости; l — длина шва.

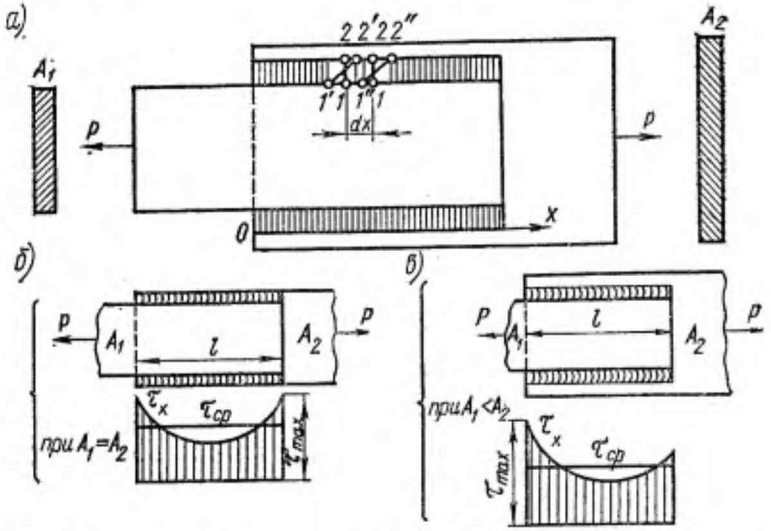


Рис. 4.6. Распределение усилий в соединении с длинными фланговыми швами, прикрепляющими узкую полосу:
а — общий вид соединения; *б* — распределение τ по длине шва при $A_1=A_2$; *в* — распределение по длине шва при $A_1<A_2$

Наибольшие значения τ_x принимает в точках $x=0$ и $x=l$:

$$\tau_{max}=\frac{\alpha P\,(1+\operatorname{ch}\alpha l)}{4\beta K\operatorname{sh}\alpha l}\approx\frac{\alpha P\operatorname{cth}\alpha l}{4\beta K}. \qquad (4.6)$$

Для равнопрочных соединений ($2[\tau]\beta Kl=[\sigma]_p A$) при условии, что $[\tau']=0{,}6[\sigma]_p$ и $\beta=0{,}7$, а также учитывая, что $\operatorname{cth}\alpha_0 l=1$, теоретический коэффициент концентрации напряжений в стальном фланговом шве ($E=2\cdot10^5$ МПа, $G=8\cdot10^4$ МПа)

$$K_\tau=\frac{\tau_{max}}{\tau_0}=0{,}58\sqrt{\frac{l}{0{,}7K}}, \qquad (4.7)$$

где $\tau_0=\frac{P}{2l\beta K}$.

Если $A_1 < A_2$, то наибольшее значение τ_x будет со стороны элемента с меньшим поперечным сечением. При условии, что все деформации упругие, эпюра распределения τ_x имеет вид, показанный на рис. 4.6, *в*.

Рассмотрим распределение нормальных напряжений между фланговыми швами в соединениях с накладками

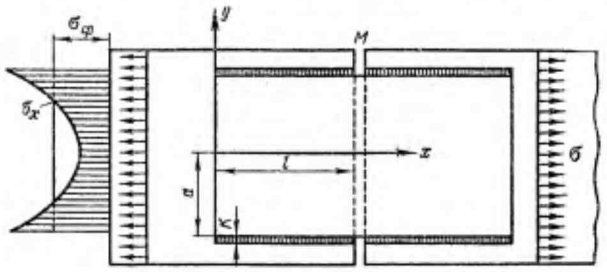


Рис. 4.7. Распределение напряжений σ_x в широкой накладке соединения с короткими фланговыми швами

(рис. 4.7). Допустим, что фланговые швы имеют небольшую длину и примем приближенно, что напряжения τ вдоль их длины одинаковы. Ширину же листов $2a$ будем считать значительной и определять концентрацию напряжений в металле листов, вызванную фланговыми швами. Силовой поток в растянутом листе сгущается в зоне фланговых швов, а средняя часть напряжена мало. Поэтому в рассматриваемом соединении одновременно распределяются нормальные напряжения. Они максимальны на краях накладки и минимальны в середине. Напряжение σ_x вдоль оси x на расстоянии y от оси накладки составляет

$$\sigma_x = 2{,}3\tau_0 \operatorname{ch} \upsilon y / \operatorname{sh} \upsilon a, \qquad (4.8)$$

где a — половина ширины накладки; l — половина длины накладки; $\upsilon = 2/3l$, τ_0 — среднее касательное напряжение во фланговых швах; $\tau_0 = \frac{\sigma_{ср} a s}{\beta K l}$; s — толщина накладки; $\sigma_{ср}$ — среднее напряжение в соединяемых элементах; l — длина шва.

Максимальное напряжение

$$\sigma_{max} = 2{,}3\tau_0 \operatorname{ct} h\, 2{,}3 \frac{a}{l}. \qquad (4.9)$$

Эпюра σ_{max} имеет вид, изображенный на рис. 4.7, и выражается законом гиперболического косинуса, т. е. цепной линией.

При $K = s$ теоретический коэффициент концентрации напряжений для этого соединения

$$K_\tau = \frac{3{,}3a \operatorname{ct} h\, 2{,}3 \frac{a}{l}}{l}. \qquad (4.10)$$

При различных отношениях a/l коэффициент концентрации принимает следующие значения:

a/l	0,1	0,5	1,0	2,0
K_τ	1,45	2,01	3,37	6,61

Приведенные данные показывают, что при значительном увеличении ширины листа по сравнению с длиной фланговых швов коэффициент концентрации нормальных напряжений в листе возрастает. В соединениях с фланговыми швами всегда возникает концентрация напряжений. В соединениях с длинными фланговыми швами при небольшом расстоянии между ними концентрация образуется главным образом в концах фланговых швов (концентрация касательных напряжений τ_x). В соединениях с короткими фланговыми швами при относительно большом расстоянии между ними концентрация возникает преимущественно в основном металле на участке между швами (концентрация нормальных напряжений σ_x). В соединениях, применяемых в сварных конструкциях, образуются обе разновидности концентраций в более или менее резко выраженной форме.

§ 4.6. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В КОМБИНИРОВАННЫХ СОЕДИНЕНИЯХ С ЛОБОВЫМИ И ФЛАНГОВЫМИ ШВАМИ

Распределение напряжений в соединениях с накладками неравномерно. В тех соединениях, где стыковые швы перекрыты односторонними накладками, образуется эксцентриситет и появляется изгибающий момент. В таких соединениях напряжения не только не уменьшаются по сравнению со стыковыми швами без накладок, но даже заметно возрастают. В соединениях, не имеющих стыковых швов, накладки также вызывают значительную концентрацию напряжений.

На рис. 4.8, *а* показаны результаты экспериментального изучения распределения напряжений в различных поперечных сечениях (*А—А*, *Б—Б*, *В—В*) соединений с односторонними накладками, когда накладки приварены к сое-

диняемым полосам только фланговыми швами. В точках, близко расположенных к фланговым швам, образуется концентрация напряжений; точки, удаленные от швов и лежащие возле оси элемента, напряжены весьма слабо.

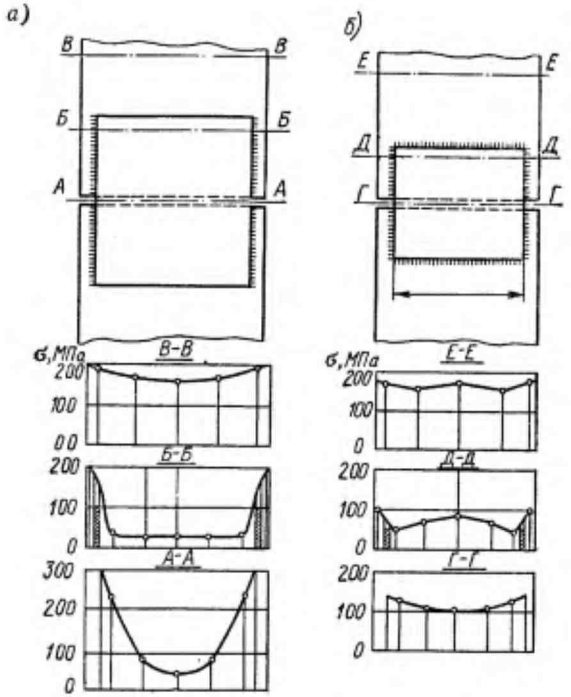


Рис. 4.8. Распределение напряжений в соединениях с накладками без стыковых швов:
а — распределение между фланговыми швами; *б* — выравнивание распределения σ в соединениях с лобовыми и фланговыми швами

Вдали от накладок эпюра напряжений в поперечном сечении выравнивается и элемент работает более равномерно.

Неравномерность распределения напряжений по поперечному сечению накладок значительно уменьшается при добавлении к фланговым швам лобовых. На рис. 4.8, *б* показано распределение напряжений в таком соединении в сечениях *Г—Г*, *Д—Д*, *Е—Е*.

§ 4.7. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ В НАХЛЕСТОЧНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ, ВЫПОЛНЕННЫХ ШОВНОЙ СВАРКОЙ

В соединениях, выполненных шовной контактной сваркой, неравномерность распределения вызвана рядом причин.

1. Распределение напряжений σ в зоне шва по длине детали при растяжении происходит неравномерно. Коэф-

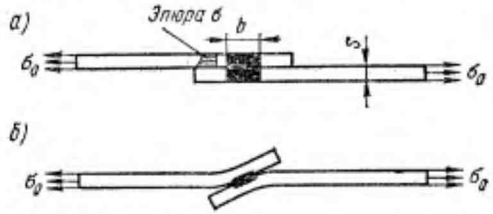


Рис. 4.9. Появление концентрации напряжений в соединениях с шовными швами:
а — неравномерное распределение σ по толщине; *б* — изгиб соединения

фициент концентрации напряжений при растяжении деталей, как правило, не велик и лишь незначительно превышает единицу.

2. При растяжении соединения происходит изгиб детали (рис. 4.9, *а*, *б*), который обычно не учитывают при расчете.

Следует помнить, что за пределом текучести происходит некоторое выравнивание напряжений и коэффициент концентрации при этом снижается.

§ 4.8. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ В ТОЧЕЧНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ, ВЫПОЛНЕННЫХ КОНТАКТНЫМ СПОСОБОМ

В точечных соединениях возникает концентрация напряжений, обусловленная рядом факторов.

1. В результате сгущения силовых линий основной металл испытывает концентрацию напряжений в надточечной зоне (рис. 4.10, *а*). Интенсивность сгущения определяет концентрацию. Она растет с ростом отношения t/d (t — расстояние между точками в направлении, перпендикулярном действию силы; d — диаметр точки). Расчетом установлено, что коэффициент концентрации напряжений в этом соединении находится в пределах $(0{,}62\ t/d)<$

$<\alpha_0<t/d$ и может вычисляться по приближенной формуле

$$K_\tau = 0{,}38 + 0{,}62\,\frac{t}{d}. \qquad (4.11)$$

На рис. 4.10, *б* показана эпюра распределения σ в продольном сечении соединения. Максимального значения напряжение достигает в сечении 0—0.

Усилия в отдельных точках соединения, расположенных в продольном ряду, при их работе в упругой области не одинаковы. При условии, что поперечные сечения соединяемых элементов равны, шаг точек в продольном ряду — t, ширина образца или шаг в поперечном направлении — $3d$.

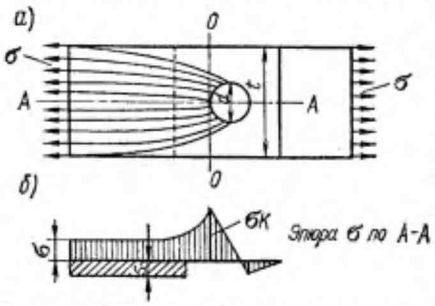


Рис. 4.10. Распределение напряжений в точечных соединениях:
а — общий вид; *б* — распределение σ в продольном сечении

Распределение усилий между точками в продольном ряду дано в табл. 4.1.

Крайние точки оказываются нагруженными значительно сильнее, чем средние. С увеличением числа точек в продольном ряду такая диспропорция возрастает. Подобное явление имеет место при работе в пределах упругости. За пределами текучести наступает значительное выравнивание усилий.

Условные способы расчета точек, изложенные в § 4.3, не дают действительного представления о полях напряжений в зонах термического влияния в пределах упругости. Сварная точка испытывает локальные напряжения в пределах упругих деформаций во много раз больше расчетных. Этим и объясняется низкая прочность точек при работе под переменными нагрузками.

Таблица 4.1

Распределение усилий между точками в продольном ряду

Номера точек	Число точек в продольном ряду		
	3	4	5
1	0,444*P*	0,436*P*	0,435*P*
2	0,112*P*	0,064*P*	0,058*P*
3	0,444*P*	0,064*P*	0,014*P*
4	—	0,436*P*	0,058*P*
5	—	—	0,435*P*

При статических нагрузках за пределом упругих деформаций концентрация напряжений в значительной степени смягчается и значения разрушающих усилий, найденные опытным путем, незначительно отличаются от расчетных.

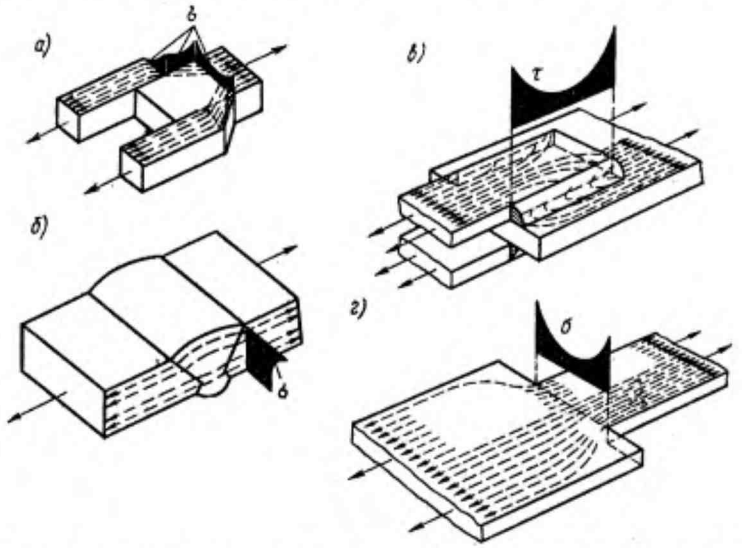


Рис. 4.11. Распределение силовых потоков и напряжений σ и τ в зоне концентраторов:
а — лобовые швы; *б* — стыковые швы; *в* — фланговые швы; *г* — в местах изменения сечения растянутых элементов

Распределение напряжений в зоне концентраторов соответствует распределению гидродинамических потоков. На рис. 4.11, *а* показаны такие потоки, образуемые в лобовом шве; на рис. 4.11, *б* — в стыковом шве; на рис. 4.11, *в* — вдоль фланговых швов; на рис. 4.11, *г* — в месте изменения ширины растягиваемого элемента. Зачерненные участки соответствуют эпюрам нормальных σ и касательных τ напряжений.

§ 4.9. КОНЦЕНТРАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ПАЯНЫХ ШВАХ

В паяных швах возникает концентрация напряжений, оказывающая заметное влияние на работоспособность всего соединения. Рассмотрим распределение напряжений в

стыковом паяном шве — тонкой мягкой прослойке с пределом текучести, меньшим, нежели у основного металла. Модуль упругости мягкой прослойки также меньше модуля упругости основного металла, поэтому она обладает повышенной деформируемостью.

Исследования, основанные на уравнениях теории упругости и пластичности, показали, что на контактных плоскостях и в зоне мягкой прослойки возникает сложнонапряженное состояние при работе ее в пределах пластических деформаций. Оно повышает $\sigma_т$ и $\sigma_в$.

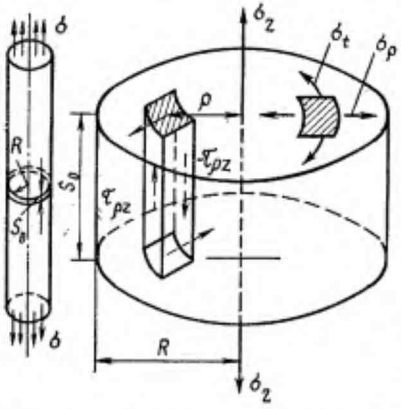


Рис. 4.12. Напряжения в мягкой прослойке стержня под действием растягивающей силы в зоне пластических деформаций

Рассмотрим работу стыковых паяных соединений элементов с круглым поперечным сечением. В зоне пластических деформаций в мягкой прослойке образцов, нагруженных продольной силой, образуются напряжения (рис. 4.12): σ_z — вдоль оси образца; σ_ρ — в направлении радиуса; σ_t — по направлению касательной; $\sigma_{\rho,z}$ — в кольцевых поверхностях.

Из теории пластичности следует, что наибольшие напряжения образуются на контактных плоскостях. Если модули упругости основного металла и мягкой прослойки близки между собой, то напряжения на контактных плоскостях определяются уравнениями

$$\sigma_z = \sigma_т \left[1 + \frac{^2/_3 (R-\rho)}{s_0} \right]; \qquad (4.12)$$

$$\sigma_\rho = \sigma_z = \frac{\sigma_т \, ^2/_3 (R-\rho)}{s_0}, \qquad (4.13)$$

где $\sigma_т$ — предел текучести металла при одноосном напряженном состоянии; R — радиус цилиндрического образца; ρ — радиус, определяющий положение точки в образце; s_0 — толщина прослойки.

Наибольшие значения напряжений достигаются на оси элемента, т. е. при $\rho=0$. С уменьшением толщины прослойки s_0 напряжение резко увеличивается. Теоретически показано, что малое значение модуля упругости прослойки $E_{просл}$ по сравнению с модулем упругости основного металла E способствует повышению прочности и понижению пластичности стыкового паяного шва.

Иная картина наблюдается в паяных соединениях нахлесточного типа, наиболее распространенного в изделиях. Распределение касательных напряжений τ по длине нахлестки в направлении действия сил происходит неравномерно и в значительной степени аналогично условиям работы сварных фланговых швов. Для соединения двух деталей с равными площадями поперечных сечений $A=sb$ (рис. 4.13) наибольшее значение усилия q_{max} на единицу длины паяного шва в концевых точках определяется уравнением

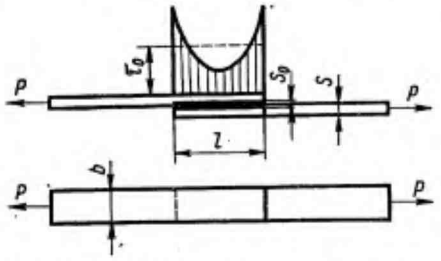


Рис. 4.13. Распределение τ в паяном соединении в пределах упругих деформаций

$$q_{max} = \frac{\alpha_0 P}{2} \left[\frac{1 + \operatorname{ch} \alpha_0 l}{\operatorname{sh} \alpha_0 l} \right], \qquad (4.14)$$

где

$$\alpha_0 = \sqrt{\frac{2Gb}{EAs_0}}; \qquad (4.15)$$

G — модуль упругости металла паяного шва при сдвиге; E — модуль упругости основного металла при растяжении; s_0 — толщина мягкой прослойки; b — ширина шва; l — длина шва; s — толщина основного металла.

Коэффициент концентрации напряжений в паяном шве (пропорционален α_0)

$$K_т = \frac{q_{max}}{q_{ср}}. \qquad (4.16)$$

Коэффициент α_0 определяют в значениях функции от $2Gs/Es_0$ (рис. 4.14). Чем меньше отношения G/E и s/s_0, тем соответственно меньше коэффициент концентрации.

Преимуществом паяных швов является возможность образования пластических деформаций в нахлесточных соединениях, сопровождаемых снижением напряжений в

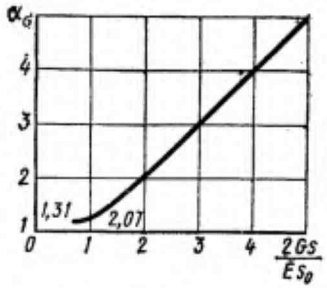


Рис. 4.14. Коэффициенты концентрации напряжений α_σ в паяных соединениях внахлестку в зависимости от $2Gs/(Es_0)$

крайних точках соединений и выравниванием эпюры напряжений по длине соединения.

При сопоставлении значений концентраций напряжений в паяном и сварном нахлесточных соединениях, состоящих из двух лобовых швов, коэффициенты концентрации напряжений высоки в обоих случаях, но при пайке они ниже. Это обстоятельство объясняется более рациональной конструктивной формой паяного соединения по сравнению со сварным.

§ 4.10. ВЛИЯНИЕ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР НА СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

У подавляющего большинства металлов при понижении температуры пределы прочности, текучести, твердости увеличиваются, и, казалось бы, эти изменения свойств могут быть использованы для назначения более высоких допускаемых напряжений и облегчения конструкций. Однако почти во всех деталях и конструкциях имеется концентрация напряжений, а при понижении температуры чувствительность многих металлов к надрезам резко возрастает.

Характер изменения свойств металлов при понижении температуры зависит от многих факторов: вида кристаллической решетки, химического состава, величины зерна, термической обработки — и проявляется по-разному в зависимости от условий нагружения и напряженного состояния.

Металлы и сплавы, у которых с понижением температуры предел текучести по сравнению с пределом прочности повышается незначительно, относятся к хладостойким. Пластичность и ударная вязкость с понижением температуры у них почти не меняется.

Металлы и сплавы, в которых предел текучести повышается значительно сильнее, чем предел прочности, пластичность заметно понижается, относятся к хладноломким.

С понижением температуры у металлов и сплавов:

пластичность обычно уменьшается более резко у конструкционных углеродистых и низколегированных сталей; слабее — у других металлов. У ряда алюминиевых и медных сплавов происходит увеличение пластичности;

сопротивление усталости при переменных нагрузках в большинстве случаев возрастает;

чувствительность к концентрации напряжений при острых надрезах возрастает, а ударная вязкость (работа разрушения) уменьшается наиболее значительно у железа, углеродистых и низколегированных сталей высокой прочности, которые имеют резко выраженную область температур перехода от вязкого к хрупкому разрушению.

К вязким разрушениям относят такие, поверхность которых имеет полностью волокнистый излом. К хрупким разрушениям относят разрушения с кристаллической поверхностью излома. Промежуточное положение занимают полухрупкие разрушения, у которых часть поверхности имеет кристаллический, а часть поверхности — волокнистый излом. Понижение температуры, увеличение скорости нагружения, увеличение концентрации напряжений способствуют переходу от вязких форм разрушения к хрупким.

Высокая работоспособность многих деталей машин, сварных соединений и элементов сварных конструкций при пониженных температурах решающим образом зависит от их способности сопротивляться хрупким разрушениям.

Наиболее распространенным и простым методом оценки изменения свойств при понижении температуры является испытание на ударную вязкость. Чем острее надрез испытуемого образца, крупнее его кристаллы, скорость ударяющего тела, тем меньше ударная вязкость.

Принято определять при понижении температуры так называемую первую критическую температуру $T_{кр}$, резко уменьшающую ударную вязкость, при которой площадь волокнистого (вязкого) излома составляет 50% общей разрушенной площади.

На рис. 4.15 показаны изменения процентного содержания волокнистого излома B, работы разрушения $a_н$, предела текучести $\sigma_т$ среднего разрушающего напряжения $\sigma_в$ в зависимости от температуры испытаний.

На хладостойкость сталей оказывают влияние химический состав металла и термический цикл сварки.

Термическим циклом устраняют вредную неоднородность, вызванную локальной закалкой при сварке; иногда достаточно применить лишь высокий отпуск.

Сильное отрицательное влияние на повышение хруп-

кости оказывают концентраторы напряжений, непровары в корне многослойных швов, в концах фланговых швов, в линиях перехода от шва к основному металлу, а также в зонах сближенных продольных коротких швов, где поперечная их усадка вызывает концентрацию пластических деформаций.

Воздействие при пластической деформации нагрева при $T=200...300$ °С вызывает охрупчивание, называемое *динамическим старением*. Именно в этих зонах нередко образуются хрупкие разрушения при последующем действии низкой температуры в эксплуатационных условиях.

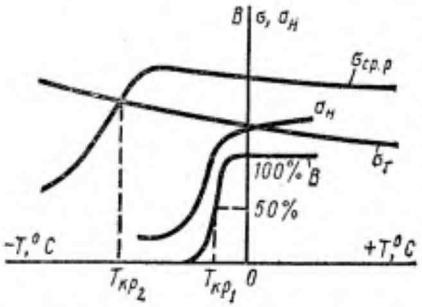


Рис. 4.15. Характер изменения доли площади с волокнистым изломом B (%) работы разрушения $a_н$, предела текучести $\sigma_т$ и среднего разрушающего напряжения $\sigma_{ср.р}$ в зависимости от температуры испытания для низкопрочных сталей

При старении металла имеет место снижение сопротивления удару и пластических свойств, а именно пластического удлинения.

Значительную опасность представляют в отношении стойкости к хрупким разрушениям стыковые и тавровые соединения с неполным проваром, а также соединения с малыми радиусами закругления в зоне сплавления швов с основным металлом, в частности в местах окончаний швов, в местах вырезов с малым радиусом в результате термической резки, в участках расслоения металла, скопления пор или шлаковых включений во всех участках с нарушением плавного распределения силового потока.

Сопротивляемость металла разрушениям при нагружениях падает в результате неблагоприятного направления к силовому потоку кристаллитов, образовавшихся в процессе кристаллизации, неоднородности свойств металла по толщине шва вследствие различных условий охлаждения разных слоев и явлений химической неоднородности, концентрации пластических деформаций при непроваре и т. д.

Важным мероприятием по повышению хладостойкости соединений является правильное назначение погонной энергии при сварке.

Очень полезно производить испытания на хладостойкость не только образцов, но и целых узлов проектируемого объекта.

На рис. 4.16, *а*. . .*м* приведены примеры хрупких разрушений: в тавровом профиле (*а*); в крестовом соединении (*б*); в зоне фланговых швов (*в*); при сварке продольными

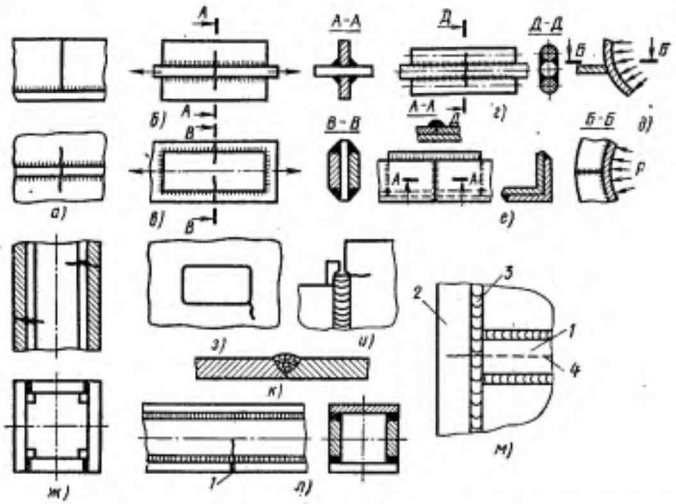


Рис. 4.16. Примеры разрушений в сварных конструкциях

швами круглых стержней (*г*); при приварке ребра к обечайке (*д*); в зоне сближенных параллельных швов (*е*); в зонах резкого перехода в коробчатых профилях (*ж*); в перечисленных угловых швах (*з*, *и*); в зонах непроваров стыковых швов (*к*); скопления швов (*л*, *м*).

Отсутствие малых радиусов перехода, непроваров, скоплений швов, применение контроля качества без разрушений позволяет заметно повысить сопротивляемость хрупким разрушениям как при нормальных, так и при низких температурах.

§ 4.11. ВЛИЯНИЕ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР НА СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

При воздействии на сварные конструкции высоких температур следует различать изменение деформации во времени при постоянных напряжениях — ползучесть и

изменение напряжений во времени при постоянных деформациях — релаксация.

Для конструкций, работающих при высоких температурах, допускаемые напряжения назначаются с учетом пластических деформаций, возникающих вследствие ползучести.

При ползучести различают три стадии: *первая* — скорость пластических деформаций уменьшается; *вторая* — скорость имеет малую постоянную величину; *третья* — нарастание скорости заканчивается разрушением.

Прочность материала при высокой температуре под напряжением в течение длительного периода называется пределом длительной прочности, который определяется опытным путем.

При повышенных температурах разрушение конструкции нередко происходит без заметных пластических деформаций.

Величина максимальной пластичности при повышенных температурах является одним из критериев склонности стали к хрупким разрушениям при комнатных температурах.

Концентраторы напряжения снижают пластичность как при высоких, так и при нормальных температурах.

Свойства сварных соединений отличаются от свойств основного металла наличием концентрации напряжений ползучести, приводящей к локальным исчерпываниям пластичности, а при длительных выдержках — к хрупким разрушениям даже в зоне мягких прослоек, что нередко имеет место.

В сварных соединениях появляются мягкие прослойки, в которых при повышенных температурах появляются хрупкие разрушения в случае длительных выдержек.

Иногда разрушения в этих прослойках носят смешанный характер — транс- и межкристаллический. Узкие мягкие прослойки часто не обнаруживают уменьшения прочности. Широкие прослойки пластичности не понижают, а нередко сохраняют прочность основного металла.

В сварных соединениях в условиях высоких температур возникают концентрации не только напряжений, но и деформаций, неравномерность которой при ползучести усиливается.

В сварных соединениях часто образуются зоны с неоднородными свойствами металла, наблюдаются дисперсионное упрочнение зерен и одновременно ослабление их границ.

Длительная прочность термически упрочненных сталей может быть невысокой вследствие образования разупрочнения зон термического влияния.

При строгом контроле неразрушающими методами качества сварных соединений и применении в необходимых случаях термической обработки допускаемые напряжения в сварном соединении оцениваются по отношению к прочности основного металла коэффициентом φ, устанавливаемым в зависимости от марки стали и технологического процесса.

Для углеродистых и низколегированных сталей $\varphi = 0{,}85 \ldots 1{,}0$ при дуговой автоматической сварке под флюсом, электрошлаковой, контактной и в среде CO_2; для всех других видов сварки $\varphi = 0{,}75 \ldots 1$.

При расчете сварных соединений на прочность, работающих при повышенных температурах, определяют допускаемые напряжения с учетом следующих трех отношений:

$$[\sigma]_p = \frac{\sigma_в}{n_1}; \quad [\sigma]_p = \frac{\sigma_т}{n_2}; \quad [\sigma]_p = \frac{\sigma_{д.п}}{n_3},$$

где $[\sigma_в]$ — предел прочности при нормальных температурах; $\sigma_т$ — предел текучести при нормальных температурах; $\sigma_{д.п}$ — предел длительной прочности; $n_1 = 2{,}5 \ldots 4{,}0$; $n_2 = 1{,}5 \ldots 2{,}0$; $n_3 = 1{,}5 \ldots 3{,}0$ — коэффициенты запаса для котельных и турбинных установок, варьирующие от ряда параметров.

Из указанных трех отношений выбирают одно, имеющее наименьшую величину.

Контрольные вопросы к главе 4

1. Что представляет собой концентрация напряжений?
2. Как происходит распределение напряжений в поперечном сечении полосы, ослабленной круглым отверстием, работающим в пределах упругих деформаций? Чему при этом равен коэффициент концентрации?
3. Что происходит с концентрацией напряжений в пластине с отверстием при переходе деформаций из упругой стадии в пластическую?
4. Какие факторы вызывают концентрацию напряжений в сварных конструкциях?
5. Каким путем происходит распределение напряжений в соединении, сваренном встык и работающем в пределах упругих деформаций? В каких точках соединение имеет максимальное напряжение?
6. Почему является полезной механическая обработка стыкового шва?
7. Какие составляющие напряжений возникают в угловом лобовом шве? Какая из составляющих имеет наибольшую величину?

8. В каких точках лобового шва касательные напряжения имеют максимум?

9. Как следует изменить нормальное очертание шва с целью снижения коэффициентов концентрации?

10. Как распределяются срезывающие напряжения в соединении узких полос и данными фланговыми швами при работе в пределах упругих деформаций?

11. В каких точках фланговых швов срезывающие напряжения имеют максимум?

12. Как определить коэффициент концентрации срезывающих напряжений во фланговых швах при одинаковых площадях поперечного сечения соединяемых элементов?

13. Какой характер имеют эпюры напряжений при разных площадях соединяемых элементов?

14. Как видоизменяется эпюра распределения τ по длине фланговых швов при работе соединения при пластических деформациях?

15. Оказывает ли влияние на прочность концентрация напряжений во фланговых швах при статических нагрузках?

16. Как распределяются нормальные напряжения в соединениях с широкими полосами и относительно короткими фланговыми швами в пределах упругих деформаций?

17. Как распределяются усилия в комбинированном соединении из лобового и фланговых швов в пределах упругих деформаций? Какие швы оказываются перегруженными?

18. Какие факторы вызывают концентрацию напряжений в точечном соединении?

19. Как велик коэффициент концентрации в точечном соединении в результате сгущения силовых линий над точкой?

20. То же, вследствие изгиба соединения.

21. Как распределяются усилия между точками в продольном ряду к действующей силе в упругой стадии?

22. В каких соединениях концентрация напряжений больше: в точечных или роликовых и почему?

23. Какие материалы в сварных соединениях более чувствительны к концентрации напряжений (стали или цветные сплавы)?

24. Высоки ли коэффициенты концентрации напряжений в соединениях, сваренных электронным лучом, электрошлаковым способом, диффузией?

25. Каковы коэффициенты концентрации напряжений при пайке?

26. Какое влияние оказывает понижение температуры на механические свойства (прочность, сопротивление)?

27. Какие факторы оказывают влияние на повышение хрупкости?

28. Какое влияние на сопротивляемость разрушению оказывает неоднородность свойств?

29. Изобразите возможные формы хрупких разрушений в зонах прикрепления уголка к полосе.

30. Какие стадии наблюдают в ползучести?

31. Какое влияние оказывает образование зон с неоднородными свойствами?

ГЛАВА 5

СОПРОТИВЛЕНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ УСТАЛОСТИ

§ 5.1. ПРОЧНОСТЬ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ (ЦИКЛИЧЕСКИХ) НАГРУЗКАХ

Современные методы расчета прочности деталей основаны на гипотезах непрерывности, однородности и изотропности материала. В действительности распределение усилий между зернами металла происходит неравномерно. В некоторых зернах могут иметь место значительные пластические деформации, в результате чего образуются микротрещины. При переменных нагрузках они имеют тенденцию развиваться: сначала развитие трещин происходит очень медленно, далее ускоряется, а на последнем этапе происходит внезапное разрушение. При этом местные напряжения оказываются опасными для прочности не только хрупких, но и пластичных металлов.

Анализ приборов усталостного разрушения очень сложен, так как требует изучения неоднородности среды (кристаллиты и межкристаллические среды). В сварных соединениях задача анализа значительно осложняется наличием остаточных напряжений и неоднородностью свойств различных зон наплавленного и основного металлов.

§ 5.2. ДИАГРАММА УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ

Прочность при переменных нагрузках зависит главным образом от числа циклов нагружений, амплитуды изменения напряжения, формы и размеров испытуемых образцов, их материала, состояния поверхности, вида нагружения (изгиб, кручение), свойств среды, в которой производится испытание (воздух, вода и т. п.).

На рис. 5.1, *а* показана диаграмма прочности металла в зависимости от числа циклов нагружений N. Максимальное напряжение, при котором материал не разрушается при достаточно большом количестве циклов нагружения, называется п р е д е л о м в ы н о с л и в о с т и. При испытании стальных образцов предел выносливости определяется, как правило, при $N=10^6$.

Усталостное разрушение — следствие постепенного развития микродефектов в материале.

Если образец испытывают при меньшем числе нагружений, то значение разрушающих напряжений называют пределом ограниченной выносливости.

Ограниченный предел выносливости определяется отношением

$$\sigma_{огр} = \sigma_r \sqrt[m]{\frac{10^6}{N}}, \qquad (5.1)$$

где N — число циклов; σ_r — предел выносливости при цикле r; m — коэффициент, который зависит от физических свойств материалов и определяется величиной угла

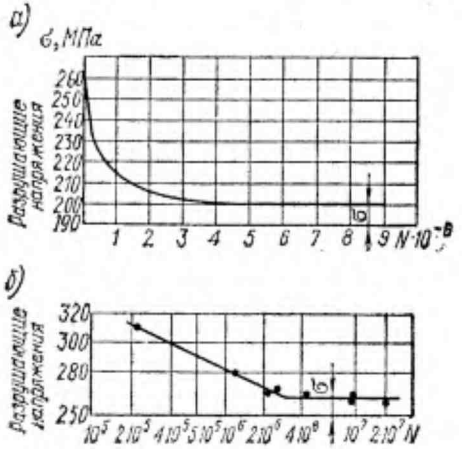


Рис. 5.1. Диаграмма прочности стали в зависимости от числа нагружений N:
а — в декартовых координатах; *б* — в полулогарифмических координатах

наклона усталостной прямой (рис. 5.1, *б*). Приближенное $m=12/K_э$, где $K_э$ — эффективный коэффициент концентрации.

На рис. 5.1, *б* изображена диаграмма прочности металла в зависимости от числа циклов нагружения, построенная в полулогарифмических координатах. Число циклов в логарифмическом масштабе отложено по оси абсцисс, а значения разрушающих запряжений — по оси ординат. Опытами подтверждено, что зависимость $\sigma=f(N)$ при построении в этих координатах может быть изображена двумя отрезками прямой (см. рис. 5.1, *б*): наклонным и горизонтальным. Горизонтальная прямая соответствует пределу выносливости.

Диаграмма строится при использовании теории вероятностей путем обработки статистического материала.

§ 5.3. ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИКЛА r НА ПРОЧНОСТЬ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗКАХ

Предел выносливости зависит в значительной степени от характеристики цикла. Цикл — совокупность всех значений напряжений за время одного периода нагружения.

Отношение $r=\sigma_{min}/\sigma_{max}$ называют коэффициентом амплитуды или характеристикой цикла, где σ_{max} и σ_{min} — соответственно наибольшее и наименьшее напряжения цикла по абсолютной величине.

На рис. 5.2, *а* показана схема цикла симметричного нагружения $|\sigma_{max}| = |\sigma_{min}|$, на рис. 5.2, *г* — от нулевого.

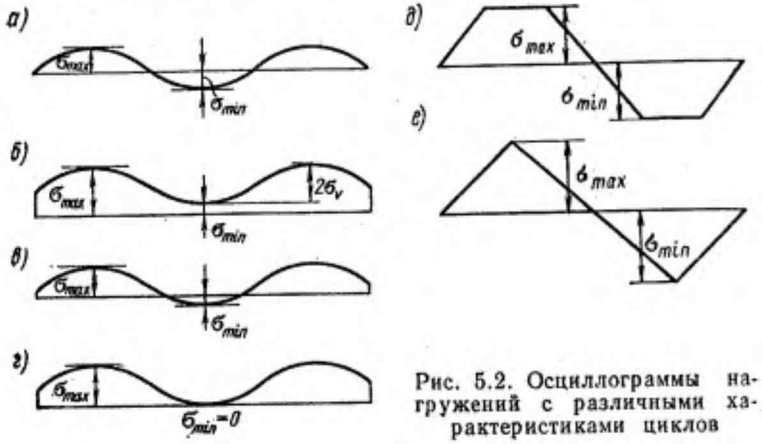


Рис. 5.2. Осциллограммы нагружений с различными характеристиками циклов

Пределы выносливости, определенные при симметричном цикле, обозначаются σ_{-1}; при отнулевом — σ_0; при произвольном — σ_r. Наибольшее значение имеют пределы выносливости при испытаниях на изгиб, несколько меньшее — при осевом нагружении и наименьшее — при кручении. Характер изменения напряжений по времени бывает различным: как синусоидальным (рис. 5.2, *а*. . .*г*), так и другой формы (рис. 5.2, *д*, *е*).

В целях изучения пределов выносливости в зависимости от характеристики циклов строится диаграмма выносливости. Наиболее часто пользуются построением диаграммы выносливости испытуемых образцов по методу Смита, представленной в схематизированной форме

(рис. 5.3). Она дает возможность на основании экспериментального определения предела выносливости при симметричном цикле σ_{-1} элементарно по диаграмме найти пределы выносливости при любом цикле σ_r. Обоснование построения подобной диаграммы получено опытным путем.

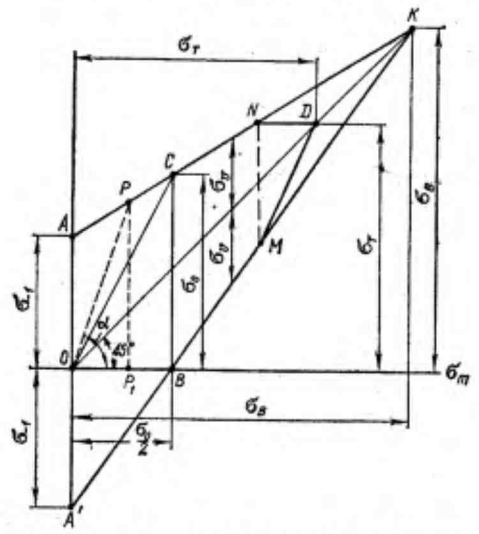


Рис. 5.3. Диаграмма прочности и усталости в координатах σ_{max}, σ_{min} и σ_m

По данным других исследований диаграмму прочности и усталости строят в форме параллельных прямых.

Обоснованием к этому служит положение, что для ряда материалов разрушение определяется главным образом диапазоном изменений напряжений σ_{-1}, в то время как постоянная составляющая $(\sigma_{max}-\sigma_{min})/2$ не имеет существенного влияния. Диаграмма может быть использована до того, как σ_r достигает $\sigma_т$. По оси абсцисс откладываются значения средних напряжений цикла $\sigma_m=(\sigma_{max}+\sigma_{min})/2$, по оси ординат — напряжения σ_{max} и σ_{min}. Под углом 45° к оси абсцисс проводится прямая. Амплитуды $\sigma_a=\sigma_{max}-\sigma_{min}$ откладываются симметрично относительно этой прямой.

Прямые пересекаются в точке K, которая характеризует цикл с бесконечно малой амплитудой. Условно принимают, что эта точка соответствует пределу прочности $\sigma_в$. Отрезок OA выражает значение предела выносливости при симметричном цикле. При этом $\sigma_m=0$.

В большинстве случаев пользуются участком диаграммы с напряжениями, не превышающими предела текучести $\sigma_т$. Из точки D с координатами $\sigma_т$ проводят горизонтальную прямую до пересечения с прямой AK в точке N. Эту точку проецируют на прямую $A'K$ в точке M. Ломаная линия $ANDMA'$ выражает схематизированную диаграмму усталости в пределах упругих деформаций. Отрезок BC выражает значение предела выносливости при пульсирующем цикле σ_0; отрезок $OB=\sigma_0/2$.

Проведем из точки O прямую под произвольным углом α к оси абсцисс, тогда

$$\operatorname{tg}\alpha=\frac{\sigma_{max}}{\sigma_m}=\frac{2\sigma_{max}}{\sigma_{max}+\sigma_{min}}=\frac{2}{1+\left(\frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}\right)}=\frac{2}{1+r}. \quad (5.2)$$

По этому отношению для заданного цикла r определяют $\operatorname{tg}\alpha$. Точка P определяет значение предела выносливости при заданном цикле нагружения.

В машиностроении нередко для определения пределов выносливости сварных соединений при цикле r поступают следующим образом. Экспериментальным путем определяют предел выносливости σ_{-1} при цикле $r=-1$ стандартного образца. Определяют предел выносливости при том же цикле проектируемого сварного соединения $\sigma_{-1с\,в}$. Находят отношение $\eta=\sigma_{-1}/\sigma_{-1с\,в}$. Перестраивают диаграмму Смита в масштабе η, и по ней определяют предел выносливости для любого цикла r, пользуясь формулой (5.2).

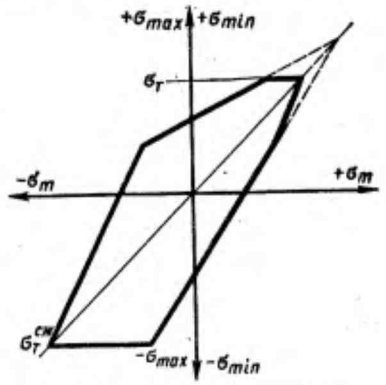


Рис. 5.4. Полная диаграмма усталости в области растяжения и сжатия

На рис. 5.4 показана полная диаграмма зависимости σ_{max} и σ_{min} от среднего напряжения σ_m в области растягивающих и сжимающих напряжений. С ростом средних сжимающих напряжений амплитуда разрушающих напряжений растет, пределом роста является предел текучести при сжатии $\sigma_т^{сж}$.

Отношение предела выносливости и предела текучести при испытании стандартных гладких образцов из

низкоуглеродистых сталей на изгиб в условиях симметричного цикла равно $\sigma_{-1}/\sigma_т \approx 0{,}6 \ldots 0{,}7$. Для низколегированных конструкционных сталей отношение $\sigma_{-1}/\sigma_т$ меньше, чем для низкоуглеродистых.

Обычно при повышении температуры пределы выносливости сталей понижаются. В агрессивных средах предел выносливости значительно уменьшается. Прочность деталей конструкций при переменных нагрузках зависит от концентрации напряжений.

§ 5.4. КОЭФФИЦИЕНТЫ КОНЦЕНТРАЦИИ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ

Эффективным коэффициентом концентрации напряжений $K_в$ называется отношение предела выносливости гладкого образца к пределу выносливости образца при наличии концентратора; $K_в \geqslant 1$; причем, чем ближе $K_в$ к единице, тем лучше работает изделие. У хрупких материалов эффективный коэффициент концентрации $K_в$ близок к теоретическому, у пластичных — он значительно меньше.

Опытами установлено, что при значениях r, близких к единице, концентрация напряжений не оказывает существенного влияния на предел выносливости. С уменьшением r влияние концентраторов на понижение предела выносливости растет, наибольшего значения $K_в$ достигает при $r=-1$.

Расчетным путем пределы выносливости для образцов с концентраторами определяются на основе статистической теории усталостных разрушений, разработанной В. П. Когаевым и С. В Серенсеном.

Чувствительность к концентраторам в образцах из низколегированной стали может быть выше, чем из низкоуглеродистой. Пределы выносливости сталей, испытанных при изгибающих усилиях и симметричных циклах, приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Пределы выносливости сталей σ_{-1}, МПа

Испытуемый образец	Ст3кп	Ст3сп	15ХСНД
Лист без обработки	121	158	188
Лист шлифованный	134	198	—
Лист с отверстиями	86	110	150

Таблица 5.2

Пределы выносливости сталей σ_{-1}, МПа, на воздухе и в воде при $N=5\cdot10^7$ циклов

Марка стали	$\sigma_в$, МПа	σ_{-1}, МПа (на воздухе)	σ_{-1}, МПа (в пресной воде)	σ_{-1}, МПа (в соленой воде)
Углеродистая, улучшенная	440	250	140	65
Никелевая	630	340	155	115
Хромованадиевая	1050	465	130	—
Нержавеющая	620	380	260	210
Кремненикелевая	1760	770	120	—

Предел выносливости основного металла в зоне термического влияния иногда изменяется по сравнению с пределом выносливости образцов из основного металла, не подвергавшегося влиянию процесса сварки. Восстановить предел выносливости можно иногда термической обработкой сварного соединения.

Заметное влияние на сопротивление усталости оказывают также размеры сечений образцов или конструктивных элементов. При увеличении диаметра образцов с 10 до 200 мм значения предела выносливости стали 22 снизились с 215 до 165 МПа, а стали 35 — со 155 до 90 МПа.

Крайне отрицательное влияние на усталостную прочность оказывает коррозионный коэффициент в агрессивных средах (табл. 5.2).

§ 5.5. ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ЦИКЛОВ НАГРУЖЕНИЯ НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ

Сварные конструкции в некоторых областях техники подвергают испытаниям при низкой частоте нагружений и доводят до разрушения при нескольких десятках тысяч циклов. Такие испытания называются повторно-статическими. Многие явления, свойственные поведению образцов под усталостными нагрузками, имеют место при повторно-статических нагрузках. Прочность образцов зависит от наличия концентраторов в соединениях, свойств материала и качества сварных соединений.

Тем не менее сопротивляемость сварных соединений

нагружениям при низкой частоте (несколько циклов в минуту, в час, в сутки) заметно ниже, чем при испытаниях с высокой частотой. Низкочастотные нагрузки снижают прочность всех видов материалов и сварных соединений. Низкочастотным нагружениям подвергаются конструкции подводных судов, резервуарно-котельные конструкции. Высокочастотные колебания нагрузки, модулированные более низкой частотой, особенно резко снижают усталостное сопротивление сварных конструкций.

§ 5.6. СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ ДУГОВОЙ СВАРКОЙ

В сварных конструкциях предел выносливости зависит от материала, технологического процесса сварки, формы конструкции, а также от рода усилия и характеристики цикла нагружения. Влияние технологического процесса сварки на прочность при переменных нагрузках обычно изучают на образцах стандартного типа, имеющих стыковые швы. В образцах со снятым усилением концентрация напряжений практически отсутствует. Как показали результаты многочисленных опытов, в таких обработанных сварных образцах из углеродистых и ряда низколегированных конструкционных сталей отношение $\sigma'_{-1}/\sigma_{-1} \geqslant 0{,}9$, где σ_{-1} — предел выносливости образца из основного металла при симметричном цикле; σ'_{-1} — предел выносливости стыкового сварного соединения. Значения предела выносливости при автоматической сварке более стабильны, нежели при ручной. Это объясняется лучшим качеством сварных швов.

Таблица 5.3

Пределы выносливости качественно выполненных сварных соединений из низколегированных сталей при различном числе циклов нагружения N

Марка стали	$\sigma_в$, МПа	σ_{-1}, МПа		Марка стали	$\sigma_в$, МПа	σ_{-1}, МПа	
		$N=2\cdot10^6$	$N=10^7$			$N=2\cdot10^6$	$N=10^7$
М16С	448	—	70	09Г2С	518	—	77
14Г2	596	97	—	10Г2С1	615	—	67
15ГС	622	100	—	15ХСНД	584	70	—
19Г	500	89	—	10ХСНД	600	78	—
10Г2СД	518	—	70	15ХГ2СМФР	767	—	72

При действии переменных нагрузок следует отдельно рассматривать прочность швов и прочность прилегающего к ним основного металла. В большинстве случаев в стыковых соединениях разрушение наступает в зонах термического влияния. Это объясняется наличием в них концентраторов напряжений от швов с необработанной поверхностью, а также разупрочнений легированных или закаленных сталей в результате теплового действия сварочной дуги. На рис. 5.5 приведены усталостные характеристики сталей и алюминиевого сплава Д16Т и их сварных соединений. Высокие отношения пределов выносливости соединений к пределам прочности основного металла имеют низкоуглеродистые стали. Аустенитные стали, высокопрочная сталь марки 30ХГСА, сплав Д16Т имеют низкие значения $\sigma'_{-1}/\sigma'_в$ и $\sigma_{-1}/\sigma_в$.

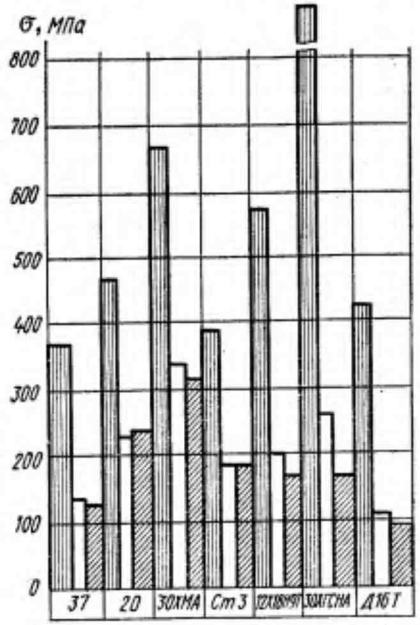


Рис. 5.5. Пределы прочности и выносливости сталей и сплава Д16Т: $\sigma_в$ — основного металла (вертикальная штриховка); σ_{-1} — основного металла (невштрихованные полосы); σ'_1 — сварного соединения (косая штриховка)

Стали повышенной прочности наиболее эффективно используются в условиях статических и переменных нагрузок при $r \geqslant 0$. Если значения коэффициентов концентрации напряжений конструкции высоки и $r \to -1$, то эффективность применения высокопрочных сталей резко понижается. Как показали исследования ИЭС им. Е. О. Патона (табл. 5.3), в этом случае пределы выносливости для сталей с совершенно различными значениями пределов прочности почти не отличаются.

§ 5.7. ВЛИЯНИЕ НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ

Решающее влияние на усталостную прочность оказывает качество технологического процесса.

При наличии технологических дефектов (шлаковых включений, пор, окислов, трещин, непроваров и т. п.) прочность сварных соединений при переменных нагрузках резко падает. Даже небольшой непровар корня шва образует надрез и концентрацию напряжений, что может существенно снижать прочность стыковых соединений при переменных нагрузках.

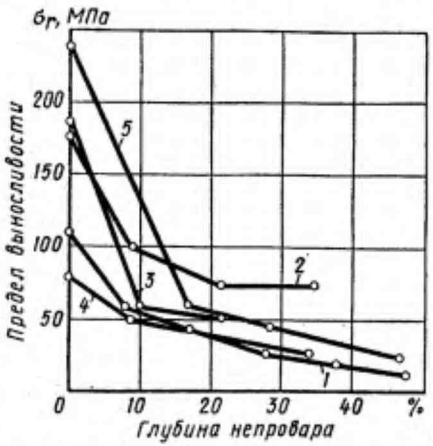


Рис. 5.6. Влияние глубины непровара в корне шва на предел выносливости стыковых соединений при растяжении (r=0,1. . .0,3; N= =$2 \cdot 10^6$ циклов):

1 — АМг6; *2* — низкоуглеродистая сталь; *3* — 12Х18Н10Т; *4* — Д16Т; *5* — 30ХГСА

Влияние непровара на уменьшение усталостной прочности зависит от рода материала. Очень чувствительны к непроварам сварные соединения из аустенитных сталей типа 12Х18Н9Т и титановых сплавов. На рис. 5.6 показано изменение пределов выносливости сталей и алюминиевых сплавов в зависимости от глубины непровара.

Помимо концентраторов напряжений, вызванных непроварами, на понижение усталостной прочности оказывает влияние наличие пор и шлаковых включений из алюминиевых сплавов.

Стыковой шов из сплава АМг6 при испытании пульсирующими циклами:

σ_0'=150 МПа — соединение без пор;

σ_0'=100 МПа — единичные поры на поверхности d= =0,8 мм;

σ_0'=84 МПа — единичные поры на поверхности d= =1,2. . .1,8 мм.

Стыковой шов из низколегированной стали:

σ_0'=260 МПа — соединение без шлаковых включений;

σ_0'=180 МПа — одно шлаковое включение;

σ_0'=100 МПа — шлаковая линия по длине.

Большое влияние на предел выносливости оказывает очертание поверхности швов. У выпуклых стыковых швов он более низкий, чем у гладких; весьма хорошие результаты получаются при снятии усилений стыковых швов или при их обработке, обеспечивающей плавный переход от шва к основному металлу. Получить соединения с хорошей прочностью можно не только при сварке прокатных элементов, но и при сварке литых деталей или прокатных с литыми.

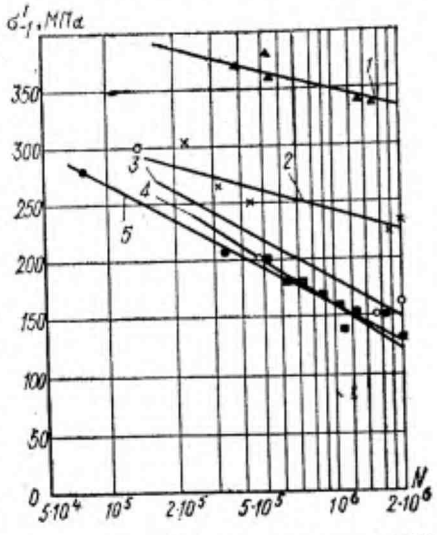


Рис. 5.7. Пределы выносливости тавровых соединений в зависимости от разделки кромок:

1 — основной металл; *2* — образец, сваренный на автомате с разделкой кромок; *3* — то же, при сварке вручную; *4* — образец, сваренный вручную, без разделки кромок; *5* — то же, при сварке автоматом

Прочность при переменных нагрузках тавровых соединений в значительной степени зависит от подготовки кромок. Экспериментально доказано, что предел выносливости таврового соединения, сваренного с подготовкой кромок, выше, чем того же соединения без подготовки кромок. Причиной этого является концентрация напряжений из-за непровара кромок. При сварке тавровых соединений на автоматах под флюсом глубина проплавления больше, чем при других видах сварки. Это обстоятельство улучшает работу соединений, подвергавшихся переменным нагрузкам (рис. 5.7).

§ 5.8. УСТАЛОСТНАЯ ПРОЧНОСТЬ РАЗНЫХ ВИДОВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Прочность нахлесточных соединений и соединений с накладками, работающих при переменных нагрузках, низка из-за концентрации напряжений в соединениях

этого рода. Она образуется в основном металле вблизи угловых швов, между швами, в поперечных сечениях самих швов, а также по длине швов вследствие неравномерного распределения усилий.

Для стали Ст3 при растягивающих усилиях и $r=0{,}15$ соединения с лобовыми швами при отношении катетов 2 : 1, когда механическая обработка отсутствует, имеют предел выносливости $\sigma_в=81...109$ МПа; при ее наличии $\sigma_в=113$ МПа.

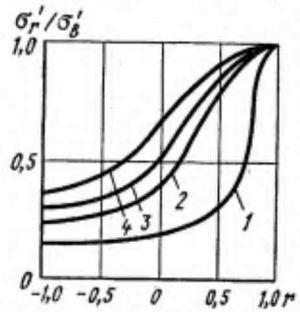


Рис. 5.8. Пределы выносливости сварных соединений с концентраторами напряжений

Особенно пониженной усталостной прочностью обладают соединения с фланговыми швами. У соединений с фланговыми швами обычного типа предел выносливости 76 МПа, в соединениях с выточками в накладках у начала фланговых швов — до 90 МПа. Эти данные указывают на низкие усталостные свойства соединений с угловыми швами и на возможность их повышения путем применения улучшенных форм и технологической обработки.

Работоспособность соединений с фланговыми швами при переменных нагрузках зависит от длины фланговых швов, от ширины накладок.

На рис. 5.8 приведены кривые пределов выносливости для различных типов сварных соединений из низкоуглеродистой стали. Кривая *1* получена для сварных соединений с наиболее резкими концентраторами напряжений; кривая *4* — с наиболее слабыми концентраторами; кривые *2* и *3* — с промежуточными. Для соединений из более прочных сталей отношение $\sigma_r'/\sigma_в'$ имеет еще меньшие значения.

На рис. 5.9 приведены значения эффективных коэффициентов концентрации $K_э$, полученные опытным путем при испытаниях сварных соединений и элементов конструкций из сталей Ст3 и 15ХСНД. Стыковые соединения имеют наименьшие значения $K_э$; соединения с фланговыми швами — наибольшие.

В конструкциях из низколегированной стали 15ХСНД коэффициенты $K_э$ выше, чем в конструкциях из стали Ст3.

Влияние концентраторов на прочность при переменных нагрузках наглядно видно на рис. 5.10, где изображены различные виды сварных соединений и их пределы выносливости при испытаниях в условиях отнулевых циклов ($r=0$).

Пределы выносливости при наличии концентраторов в форме дефектов возрастают с повышением статической

Схемы видов сварных соединений		$K_э$	
Вид в плане	Разрезы	Ст3	15ХСНД
Обработано	Стыковое соединение с обработкой стыкового шва	1,0	1,0
	Технологическим путем осуществленный плавный переход от шва к основному металлу	1,2	1,33
	Без механической обработки обычного качества	1,4	1,8
	Ручная сварка	1,6	2,2
	Обрыв стенки	2,0	2,8
	$b=2a$	2,3	3,2
		2,5	3,5
		3,4	4,4
	Обрыв поясов	4,0	4,9

Рис. 5.9. Эффективные коэффициенты концентрации $K_э$ сварных соединений сталей Ст3 и 15ХСНД

прочности лишь в незначительной степени. Сопоставим стали Ст3 и 30ХГСА. Их пределы прочности имеют отношения 40/160, а пределы выносливости — 6/7, т. е. практически не меняются.

При дефектах высокие пластические свойства аустенитной стали Х18Н9Т не оказывают улучшающего действия в отношении выносливости.

Без дефектов Ст3 имеет σ_r=150 МПа, сталь Х18Н9Т — σ_r=170 МПа, при дефекте (непровар 50%) Ст3 имеет σ_r= =60 МПа, сталь Х18Н9Т — σ_r=35 МПа.

Экспериментальным путем установлено, что усталостная прочность сварных соединений элементов больших

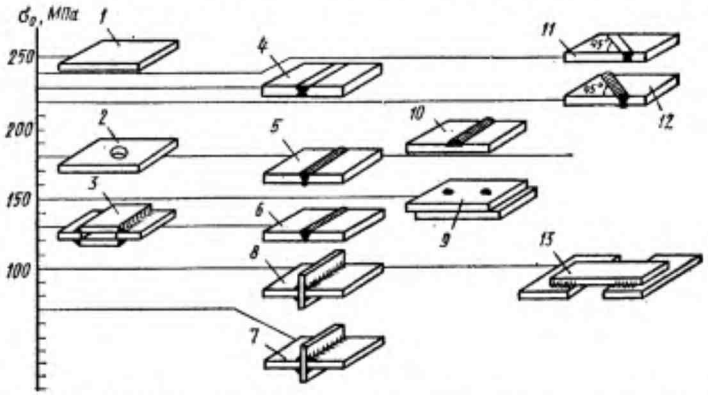


Рис. 5.10. Пределы выносливости сварных соединений из стали 37 при r=0:

1 — целая полоса; *2* — полоса с отверстием; *3* — модель соединения с лобовыми швами; *4* — шов обработан, подварен; *5* — шов не обработан, подварен; *6* — шов без подварa; *7* — крестовое соединение, швы не обработаны; *8* — то же, швы обработаны; *9* — соединение с заклепками; *10* — поперечный валик без обработки; *11* — косой шов обработан; *12* — то же, не обработан, подварен; *13* — фланговые швы обработаны

толщин, сваренных электрошлаковым способом из низкоуглеродистых и углеродистых сталей, например марки 35Л, удовлетворительная. С увеличением размера сварного элемента предел выносливости несколько снижается. Однако достаточная прочность сварных соединений при переменных нагрузках позволяет применять электрошлаковую сварку в самых ответственных машиностроительных конструкциях.

§ 5.9. ВЛИЯНИЕ НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ ТЕРМООБРАБОТКИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Заметное влияние на повышение усталостной прочности часто оказывает термообработка сварных конструкций. Это видно из данных табл. 5.4, где приведены результаты испытаний сварных соединений из низкоуглеродистой

Таблица 5.4

Предел выносливости элементов 65×75 мм при различной термообработке

Вид соединения	Термообработка	σ'_{-1}, МПа
Основной металл	Нет	185
Сварное соединение с V-образным швом	»	75
То же	Отпуск при 620 °С	115
То же, усиление шва снято	Нет	105
То же	Отпуск при 620 °С	145
»	Нормализация при 930 °С и отпуск при 620 °С	175...185

стали 22К. При сварке элементов больших толщин термическая обработка, особенно в сочетании со снятием усиления, приводит к заметному повышению усталостной прочности. При высокой концентрации напряжений в ряде случаев термическая обработка не эффективна и даже снижает прочность при переменных нагрузках.

§ 5.10. ВЛИЯНИЕ НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ ОБЕРТОНОВ

В процессе вибраций металлических конструкций резко выделяется самый низкий основной тон. Он сопровождается образованием наименьших амплитуд деформаций и напряжений. По основному тону разработчики проектов определяют частоту колебаний, вычисляют допускаемое напряжение при циклических нагружениях. Как правило, тон сопровождается дополнительными тонами — обертонами, имеющими большую частоту и значительно меньшие амплитуды. Обертоны часто проявляются в форме дребезжаний.

Как показали исследования последних лет, наличие обертонов оказывает заметное отрицательное влияние на несущую способность конструкций. Ниже приводятся отношения типовых частот и амплитуд обертона к основному тону в некоторых видах объектов (табл. 5.5).

Напряжения, вызываемые обертонами, достигают 50% от напряжений основного тона.

За рубежом в настоящее время нередко изучают сопротивляемость воздействиям на конструкцию перемен-

ных нагрузок непосредственно на самих объектах в условиях реальных загружений.

Последние подвергаются нагружениям, не строго ритмичным и однородным, как это имеет место при испытаниях образцов на машинах в лабораторных условиях, а при

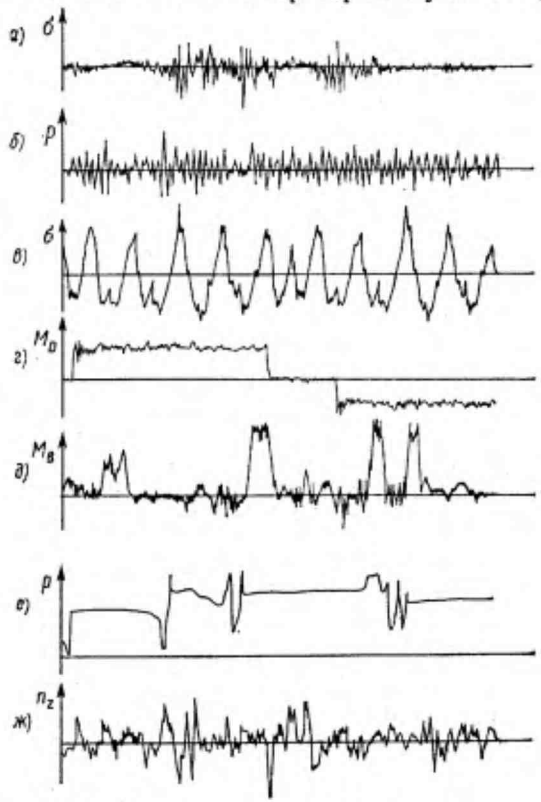


Рис. 5.11. Примеры диаграмм колебаний конструкций

сложных формах нагружений, которые вызывают групповые колебания.

На рис. 5.11, *а* приведен пример диаграммы колебаний напряжений, измеренных в задней оси автомобиля; на рис. 5.11, *б* — диаграмма колебаний давления в камере реактора; на рис. 5.11, *в* — диаграмма изгибающих моментов в кузове автомашины; на рис. 5.11, *г* — диаграмма крутящих моментов в прокатной машине; на рис. 5.11, *д* — диаграмма колебаний напряжений, измеренных в колесе

Таблица 5.5

Отношения типовых частот и амплитуд обертона к основному тону для разных объектов

Объект	σ_2/σ_1	K_2/K_1
Фермы, железнодорожные мосты	0,15...0,25	30...100
Фюзеляж самолета	0,10...0,50	25...150
Гидротурбины	0,03...0,50	115...500

σ_1, σ_2 — напряжения основного тона и обертона соответственно; K_1, K_2 — частота колебаний основного тона и обертона.

автомашины; на рис. 5.11, *е* — диаграмма давлений в трубопроводе; на рис. 5.11, *ж* — диаграмма колебаний в центре тяжести крыла.

Сопоставление диаграмм, снятых при испытаниях конструкций различных типов, приводит к следующим обобщениям.

Характер диаграмм колебаний в ряде случаев беспорядочный, отсутствует строгая периодичность, которую мы наблюдаем при испытании лабораторных образцов и у некоторых строго циклично работающих машин.

Соотношение между основным тоном и обертонами, которые появляются в групповых колебаниях при значительных амплитудах, могут быть как более или менее постоянными, так и непрерывно изменяющимися во времени.

Совокупность обертонов способна оказывать в разных случаях трудно предсказуемый эффект.

§ 5.11. СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ КОНТАКТНОЙ СВАРКОЙ

Соединения, выполняемые контактной стыковой сваркой, обладают высокими механическими свойствами не только при статических, но и при переменных нагрузках. При сварке низкоуглеродистых и многих низколегированных сталей соединения имеют предел выносливости, близкий к пределу выносливости основного металла. Большое влияние на усталостную прочность оказывает не только качество провара стыка, а также состояние его поверхности. При грубой обработке поверхности предел выносли-

вости меньше, при гладкой, особенно полированной,— больше.

Усталостная прочность точечных соединений значительно уступает прочности стыковых. Точечные соединения условно рассчитывают по напряжениям среза. Однако их разрушения при работе под переменными нагрузками почти всегда происходят в результате разрывов металла в надточечной или околоточечной зоне. Эти разрушения вызваны концентраторами напряжений. Усталостная прочность точечных соединений в большей степени зависит от того, являются ли они связующими или рабочими, от рода материала и степени его чувствительности к концентраторам напряжений..

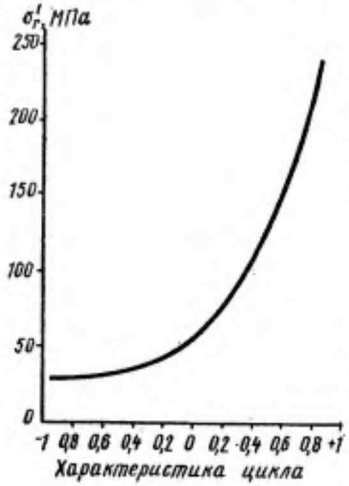


Рис. 5.12. Зависимость предела выносливости точечных соединений от характеристики цикла

Данные экспериментов показывают, что пределы выносливости рабочих точек намного ниже, чем связующих, что наименее чувствительны к концентраторам точечные соединения из низкоуглеродистых сталей, более чувствительны соединения из аустенитной стали 12Х18Н10Т и из стали 30ХГСА после закалки и низкого отпуска.

Усталостная прочность в сильной степени зависит от конструкции соединения. Чем больше шаг между точками в ряду, направленном перпендикулярно действующей силе, тем выше концентрация напряжений и ниже усталостная прочность. В соединениях с двусрезными точками усталостная прочность повышается более чем в два раза по сравнению с односрезными. Качество сварных точек, особенно рабочих, также влияет на усталостную прочность. Внутренние трещины в точке оказывают небольшое влияние на значение разрушающей нагрузки; нагруженные же трещины могут снизить ее в три раза и более. Очень большое влияние на усталостную прочность точек оказывает характер цикла испытаний (рис. 5.12). При знакопеременных нагружениях предел выносливости в несколько раз меньше, чем при знакопостоянных.

Таблица 5.6

Коэффициент $K_э$ точечных и шовных соединений

Марка материала	Толщины соединяемых частей, мм	Связующие		Рабочие	
		точечные	шовные	точечные	шовные
Сталь 10	3—3	1,4	1,25	7,5	5,0
Сталь 12Х18Н10Т	1,5—1,5	2,0	2,0	12,0	7,5
Титановый сплав	1,5—1,5	2,0	1,3	10,0	5,0
Алюминиевый сплав Д16Т	1,5—1,5	2,0	1,3	12,0	2,25
Сталь 30ХГСА	1,5—1,5	2,0	—	12,0	—

Усталостная прочность соединений, выполненных шовной сваркой, ниже стыковой, но выше, чем при точечной, так как соединения обеспечивают более равномерный силовой поток. Примерные значения эффективных коэффициентов концентрации напряжений $K_э$ для точечных и шовных соединений приведены в табл. 5.6.

§ 5.12. ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ РАБОТЫ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗКАХ. ПОСЛЕСВАРОЧНАЯ ОБРАБОТКА СОЕДИНЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ

Главные принципы проектирования конструкций.

1. Проектирование соединений при минимальной концентрации напряжений, выполненных дуговой и контактной сваркой, а также угловых швов с формой очертаний, обеспечивающих наиболее равномерное распределение в них напряжений. Плавные переходы от наплавленного металла к основному получаются и при обработке швов аргонодуговой сваркой вольфрамовым электродом. После такой обработки в стыковых соединениях из стали Ст3 предел усталости σ_{-1} повышается с 80 до 120 МПа. Эффект повышения усталости соединений из низкоуглеродистых и низколегированных сталей достигается также механической зачисткой швов.

2. Учет термообработки сталей, в результате которой основной металл при переменных нагрузках приобретает пониженную прочность в зоне отпуска. Аналогичное понижение предела выносливости в зоне отпуска наблюдается в сварных соединениях термически обработанных

цветных сплавов (алюминиевые, магниевые и др.). Разрушение происходит на небольшом расстоянии Δ от границы шва (рис. 5.13), где предел выносливости ниже, чем в основном металле, не подвергавшемся отпуску. Повы-

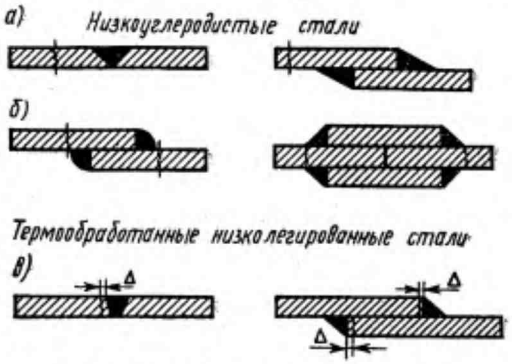


Рис. 5.13. Локализации вероятных разрушений сварных соединений из низколегированных сталей при переменных нагрузках

шается прочность сварных соединений легированных сталей при переменных нагрузках последующей термической обработкой изделий.

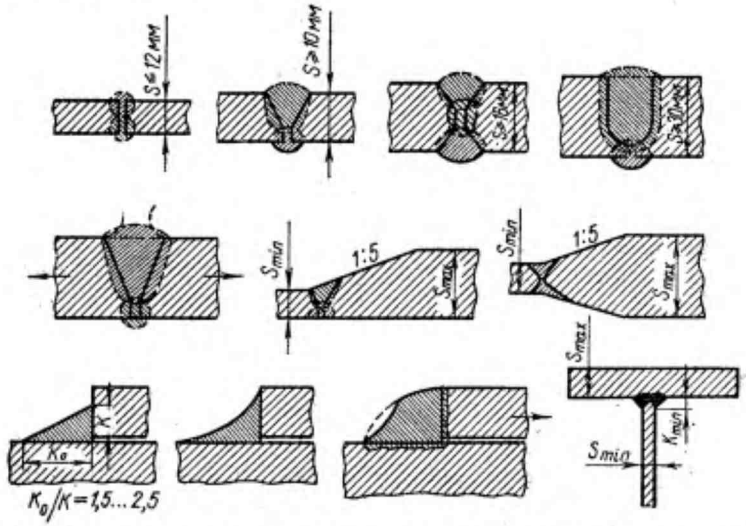


Рис. 5.14. Рекомендуемое оформление соединений со стыковыми и угловыми швами, работающими под переменными нагрузками

Основной металл термически не обработан, качество сварки высокое, швы обработаны — разрушение в целом металле либо в зоне термического влияния (рис. 5.13, *а*). Швы не обработаны — разрушение в зоне термического влияния (рис. 5.13, *б*). Основной металл термически обработан. Возможны разрушения в мягкой прослойке (рис. 5.13, *в*).

3. Повышение усталостной прочности механической обработкой деталей, обеспечивающей плавное сопряжение наплавленного и основного металла (рис. 5.14). Эффективность такого приема можно видеть на примере приварки планок к листовым элементам, изображенным на рис. 5.15, *а*. . .*в*. Для сравнения на рисунках указаны пределы выносливости. При отсутствии выкружки (рис. 5.15, *г*) предел выносливости существенно снижается (по сравнению с рис. 5.15, *а*. . .*в*).

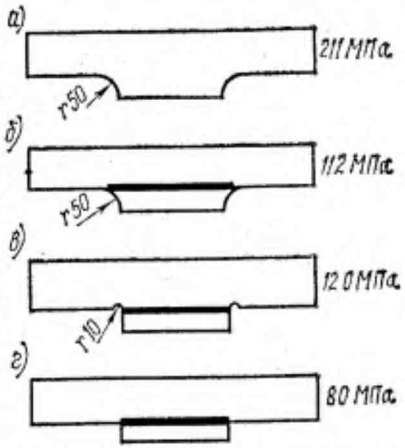


Рис. 5.15. Влияние конструкции на усталостную прочность:
а — выкружка в целом элементе полосы; *б* — выкружка в приваренном элементе; *в* — деконцентратор; *г* — швы без обработки

Устранить по возможности вредное влияние остаточных напряжений на несущую способность, которое для различных сталей и видов концентраторов напряжений может оказаться совершенно различным.

Остаточные напряжения могут понижать несущую способность конструкции, чаще всего не оказывают на нее влияния, а в некоторых случаях даже и повышают ее. Аналитически предел выносливости образца с остаточными напряжениями при $r=-1$ может быть выражен следующей формулой:

$$\sigma_{-1}^{ост} \leqslant \sigma_{-1}\left(1-\frac{\sigma_{ост}}{\sigma_в}\right), \qquad (5.3)$$

где σ_{-1} — предел выносливости при симметричном цикле в отсутствие остаточных напряжений; $\sigma_{ост}$ — остаточные растягивающие напряжения в зоне возможного разрушения; $\sigma_в$ — предел прочности материала.

При сжимающих $\sigma_{ост}$ предел прочности σ_{-1} повышается.

Отпуск при температуре 650 °С, устраняющий остаточные напряжения, вызванные сваркой, как правило, не повышает усталостную прочность низколегированных сталей. Это объясняется тем, что отпуск не только устраняет остаточные напряжения, но и изменяет до некоторой степени механические свойства металла — снижает предел текучести. На рис. 5.16, *а*, *б* можно видеть различное влияние отпуска на усталостную прочность образцов из

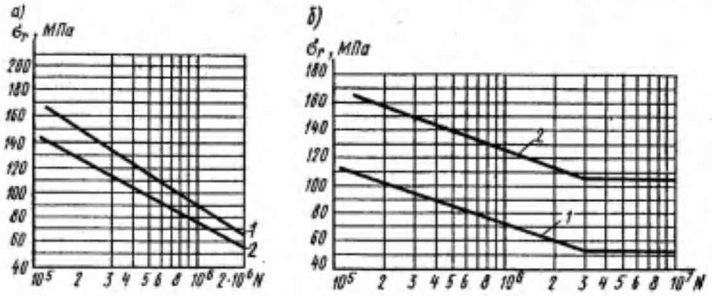


Рис. 5.16. Результаты испытаний сварных образцов с фланговыми (*а*) и пересекающимися стыковыми (*б*) швами при переменных нагрузках:

1 — в исходном состоянии; *2* — после высокого отпуска

низкоуглеродистой стали. При нагружениях в условиях симметричного цикла отпуск полезен; при $r=0$ — бесполезен; при $r>0$ — снижается предел выносливости.

§ 5.13. ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ

Остаточные напряжения могут быть не только вредными, но и полезными. Если в зоне наибольших растягивающих напряжений от внешних нагрузок создать сжимающие остаточные напряжения, то последние будут способствовать повышению усталостной прочности сварных соединений.

Благоприятные остаточные напряжения сжатия можно создать местной пластической деформацией. С этой целью сварные соединения иногда подвергают поверхностной механической обработке: прокатке роликами или, что является более простым и удобным, обдувкой дробью, обработке пневматическим молотком или пучком проволок ударными методами. При этом в поверхностных слоях металла происходит пластическая деформация, которая вызывает наклеп металла, сопровождающийся повышением

$\sigma_т$, и, кроме того, образуются остаточные напряжения сжатия. Чем выше коэффициент концентрации напряжений в сварном соединении, тем более эффективно применение поверхностной обработки швов.

Эффект повышения предела выносливости сварных точечных соединений достигается их обжатием ковочным давлением при остывании. Проковка повышает сопротивляемость усталостным разрушениям в 1,4. . .2,0 раза, а при обработке специальным инструментом и скоростной проковке — в большей степени.

ИЭС им. Е. О. Патона разработан способ повышения усталостной прочности сварных соединений обжатием посредством взрыва. Вдоль швов укладывают трубки со взрывчатым веществом. В результате действия взрывной волны усталостная прочность повышается. Значительное повышение усталостной прочности может быть получено в результате обработки соединений ультразвуковым инструментом.

Выносливость сварных соединений может быть увеличена предварительным их нагружением при одновременном устранении вредных растягивающих остаточных напряжений в зоне концентраторов. Иногда считают полезным создание предварительных напряжений в тонкостенных конструкциях и подвержение их вибрации. При этом остаточные растягивающие напряжения уменьшаются на несколько десятков процентов, а сопротивление усталостным нагрузкам повышается.

§ 5.14. РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ПРЕДЕЛОВ ВЫНОСЛИВОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

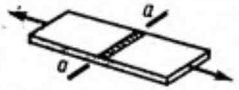
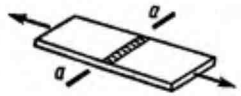
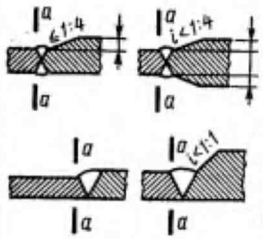
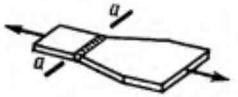
При определении допускаемых напряжений в конструкциях, работающих под действием переменных нагрузок, в настоящее время имеет место два подхода.

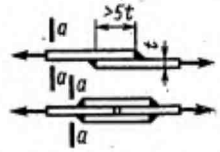
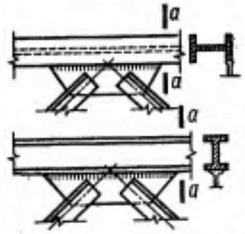
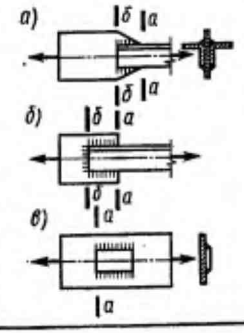
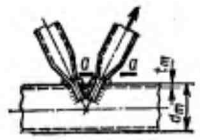
Первый подход отражен в нормативах Государственного комитета по делам строительства (Госстрой СССР). СНиП (Строительные нормы и правила) ч. II. Нормы проектирования. Гл. 23 «Сварные конструкции» (Стройиздат, 1982 г.).

Строительные нормы используются при проектировании сварных металлоконструкций, входящих в сферу строительства. Иногда их используют при проектировании других объектов, например подъемно-транспортных машин и т. д.

Таблица 5.7

Виды соединений с различными эффективными коэффициентами концентрации

№ п/п	Схема элемента и расположение расчетного сечения	Характеристика элемента	Группа элемента	$K_э$
1	Металлическая полоса. Кромки получены: прокатом машинной газовой резкой		1 2	1,0/1,0
2		Стыковой шов, выполненный на подкладном листе, нагрузка перпендикулярна сварному шву	1	1,0
3		Стыковой необработанный шов; нагрузка перпендикулярна сварному шву; стыкуемые элементы одинаковой ширины и толщины	2	—
4		Основной металл в месте перехода к стыковому шву со снятым механическим способом усиления шва: при стыковании элементов одинаковой толщины и ширины то же, разной толщины и ширины	2 3	—
5		Стыковой необработанный шов; стыкуемые элементы разной ширины и разной толщины	4	2,5/2,0

№ п/п	Схема элемента и расположение расчетного сечения	Характеристика элемента	Группа элемента	$K_э$
6		Основной металл в месте перехода к поперечному (лобовому) угловому шву: без обработки при обработке углового шва	6 4	3,2/2,5
7		Фасонки, приваренные встык или втавр к стенкам и поясам балок, а также к элементам ферм при 45°	4	1,4/1,2
8		Основной металл в соединениях с фланговыми швами (в местах перехода от элемента к концам фланговых швов): а) с двойными фланговыми швами б) с фланговыми и лобовыми швами в) при передаче усилия через основной металл	8 7 7	4,0/3,2 2,0/1,6
9		Основной металл трубы растянутого раскоса при отношении толщины к наружному диаметру трубы пояса: 1/20 1/14	 7 8	

Продолжение табл. 5.7

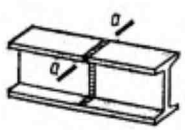
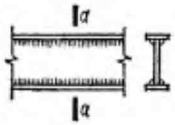
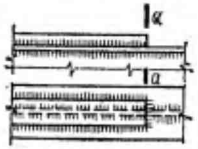
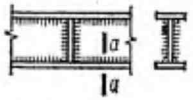
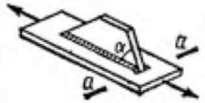
№ п/п	Схема элемента и расположение расчетного сечения	Характеристика элемента	Группа элемента	$K_э$
10		Сварные сечения двутаврового, таврового и других типов, сваренные непрерывными продольными швами при действии усилия вдоль оси шва:		
		кромки обрезаны газом	2	1,2/1,2
		кромки обрезаны вручную	4	1,8/1,4
11		Соединение встык прокатных профилей	4	
12		Обрыв поясного листа без механической обработки поперечного (лобового) шва	7	3,2/2,5
13		Основной металл растянутых поясов балок и элементов ферм вблизи диафрагм и ребер, приваренных угловыми швами	5	1,6/1,2
14		Элемент со вспомогательным элементом, приваренным продольными швами при α:		
		до 45°	4	
		90°	7	

Таблица 5.8

Значение $R_т$ в функции группы, к которой принадлежит соединение, и от величины предела прочности разрыву стали $\sigma_в$

Группа элементов	$\sigma_в$, МПа				
	до 420	420...440	440...520	520...580	580...675
1	120	128	132	136	145
2	100	106	108	110	116
3	90	90	90	90	90
4	75	75	75	75	75
5	60	60	60	60	60
6	45	45	45	45	45
7	36	36	36	36	36
8	27	27	27	27	27

В основу указанных нормативов положено разделение видов сварных соединений на 8 групп (табл. 5.7) в значительной степени в зависимости от эффективных коэффициентов концентрации напряжений (в таблице первое значение $K_в$ для низколегированных сталей; второе — для низкоуглеродистых). Напомним, что у строителей используются расчетные сопротивления (вместо допускаемых напряжений): по пределу текучести — делением $\sigma_т$ на коэффициент надежности; по пределу прочности — делением $\sigma_в$ на коэффициент надежности.

Основное внимание уделяется расчету предела прочности основного металла в зоне сварных швов.

Максимальное допускаемое напряжение в соединении определяется из условия

$$\sigma_{max} = \alpha R_т \gamma, \qquad (5.4)$$

где $R_т$ — расчетное сопротивление по пределу текучести, принимаемое по табл. 5.8 в зависимости от расчетного сопротивления по текучести стали и группы соединений; α — коэффициент, учитывающий ожидаемое количество нагружений и вычисляемый по формулам для групп 1 и 2:

$$\alpha = 0{,}64\left(\frac{n}{10^6}\right)^{\frac{2}{3}} - 0{,}5\,\frac{n}{10^6} + 1{,}75;$$

для групп 3. . .8

$$\alpha = 0{,}07\left(\frac{n}{10^6}\right)^{\frac{2}{3}} - 0{,}64\,\frac{n}{10^6} + 2{,}2.$$

Коэффициент γ, определяемый по табл. 5.9, зависит от вида напряженного состояния и коэффициента асим-

метрии цикла:

$$r = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}},$$

где σ_{min} и σ_{max} — минимальное и максимальное напряжения по абсолютной величине, взятые со своими знаками.

Таблица 5.9

Значения коэффициентов γ в зависимости от r

Род усилия	Коэффициент	Формула для определения
Растяжение	$-1<r<0$ $0<r<0{,}8$ $0{,}8<r<1$	$\gamma=2{,}5/(1{,}5-r)$ $\gamma=2{,}0/(1{,}2-r)$ $\gamma=1{,}0/(1-r)$
Сжатие	$-1<r<1$	$\gamma=2{,}0/(1-r)$

При σ_{min} и σ_{max} разных знаков коэффициент r имеет знак минус.

Ни в одном случае σ_{max} не должна превышать $\sigma_т/1{,}3$.

Ниже приведена табл. 5.10 сопротивления по пределу текучести и пределу прочности.

Таблица 5.10

Значения расчетных сопротивлений по пределу прочности и пределу текучести для сталей

Марка стали	$R_т$	$R_{пр}$	s, мм
ВСт3кп2-1	210	335	11...20
ВСт3сп5-2	270	370	11...20
09Г2 гр. 1	300	430	11...20
15ХСНД	330	465	4...32
10ХСНД	335	480	4...32
18Г2АФНС	400	535	4...32

Расчет прочности самих швов производится с учетом следующего.

При применении сварочных материалов высокого качества, при полном проваре стыковых соединений и при проверке качества швов физическими методами контроля расчета их прочности вовсе не требуется.

Особенностью изложенного подхода к расчету сварных соединений под переменными нагрузками является то, что

допускаемые напряжения для групп 3. . .8 остаются постоянными вне зависимости от пределов прочности и текучести сталей. Это объясняется весьма сильным влиянием концентрации напряжений, которая растет с ростом $\sigma_в$ и $\sigma_т$.

Концентрация напряжений определяется геометрией соединений и технологическими, иногда мелкими дефектами, оказывающими в то же время сильное влияние на усталостную прочность. Их влияние настолько велико, что и расчет на усталостную прочность соединений осуществляется, как было указано выше, прочностью околошовной зоны, но разумеется с учетом группы.

Второй подход осуществляется преимущественно в тех случаях, когда швы тщательно обрабатываются, при устранении отдельных мелких дефектов. Это выполняется в сварных пролетных строениях железнодорожных мостов, в деталях машин. При этом расчет проводится на допускаемые напряжения при статической нагрузке $[\sigma]_{p_0}$, равные $[\sigma]_p\eta$, где $[\sigma]_p$ — допускаемое напряжение при статической нагрузке, η — коэффициент понижения допускаемых напряжений при переменных нагружениях по сравнению со статическими:

$$\eta = \frac{1}{\psi(\rho K_в \pm \Delta) - (\rho K_в \mp \Delta) r}, \qquad (5.5)$$

здесь ψ зависит от длины линии влияния. При ее длине больше 24 м $\psi=1$; $\rho\approx0{,}6$; $\Delta\approx0{,}2$.

Верхние знаки в формуле (5.5) применяются, если наибольшие напряжения при растяжении, нижние — если при сжатии:

$$r = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}};$$

$K_в$ принимаются по таблице для соединений мостовых объектов и других спецобъектов.

В машиностроении единые нормы допускаемых напряжений при расчете под переменными нагрузками не установлены. Это объясняется многообразием форм конструкций и условиями их работы.

Коэффициент γ определяют отношением допускаемых напряжений при переменных нагрузках к допускаемым напряжениям при статических.

Вычисление производят с учетом следующих факторов:

предела выносливости металла σ_{-1} на образце при симметричных циклах; $r=-1$ при числе нагружений $N=10^6...10^7$;

амплитуды напряжений цикла σ_a;

среднего значения напряжений в процессе циклического нагружения σ_m, равного $(\sigma_{max}+\sigma_{min})/2$ (σ_{max} и σ_{min} — максимальное и минимальное значения величины напряжений цикла по абсолютной величине, взятые со своим знаком);

напряжения σ_r, определяемого по диаграмме Смита (см. рис. 5.3) в зависимости от материала (предел выносливости при симметричном цикле) и характеристики цикла r.

Допускаемое напряжение при этом определяется по формуле

$$[\sigma]_p = \frac{[\sigma]_r}{nK_э}, \qquad (5.6)$$

где n — коэффициент запаса, принимаемый в пределах 1,4. . .1,6; $K_э$ — эффективный коэффициент концентрации напряжений для рассматриваемого типа соединений.

По приведенной формуле устанавливается допускаемое напряжение растяжения (изгиба).

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

Пример 1. Определить несущую способность прикрепления полок шириной 200 мм, толщиной 10 мм к косынке лобовыми швами длиной $l_1=20$ мм и фланговыми швами длиной $l_2=15$ см; $r=0,2$ (растяжение), материал — сталь ВСт3сп5-2 (см. табл. 5.10). Расчетное сопротивление по пределу прочности $R_п=370$ МПа, расчетное сопротивление по пределу текучести $R_т=270$ МПа, коэффициент условий работы $m=0,8$, коэффициент надежности $k=1,1$, число нагружений $n=10^6$.

При статическом нагружении допускаемое напряжение для металла полосы

$$[\sigma]_p = R_т \frac{m}{k} = 270 \frac{0,8}{1,1} = 196 \text{ МПа};$$

в угловых швах

$$[\tau'] = 0,55 R_п \frac{m}{k} = 0,55 \cdot 370 \frac{0,8}{1,1} = 144 \text{ МПа}.$$

При переменных усилиях максимальное (допускаемое) напряжение в полосе

$$\sigma_{max} = \alpha R_0 \gamma_0,$$

здесь α определяется числом нагружений.

Соединение относится к группе 8, поэтому

$$\alpha = 0,07 \cdot \left(\frac{10^6}{10^6}\right)^2 - 0,64 \left(\frac{10^6}{10^6}\right) + 2,2 = 1,43;$$

R_0 — расчетное сопротивление (см. табл. 5.8).

Для группы 8 принимается $R_0=27,0$ МПа.

$$\text{При } r=0,6;\ \gamma_0 = \frac{2,0}{1,2-r} = \frac{2,0}{1,2-0,6} = 1,91.$$

Таким образом, нормальное допускаемое напряжение при переменных нагрузках в полосе

$$[\sigma]_p = \alpha R_0 \gamma_0 = 1,43 \cdot 27 \cdot 1,91 = 73,7 \text{ МПа}.$$

Допускаемое усилие на полосу

$$P_1 = [\sigma]_p A_{пол} = 73,7 \cdot 20 \cdot 1 \cdot 10^{-4} = 0,147 \text{ МН}.$$

Допускаемые напряжения в угловом шве $[\tau']=49,2$ МПа.

Расчет угловых швов при переменных нагружениях производится по тем же формулам, что и при статических.

Таким образом, несущая способность швов, приваривающих полосу при ручной сварке ($\beta=0,7$),

$$P_2 = (20+2 \cdot 15 \cdot 1) \cdot 0,7 \cdot 1 \cdot 10^{-4} \cdot 49,2 = 171 \text{ МН}.$$

Следовательно, прочность прикрепления швами обеспечивается.

Пример 2.

Определить несущую способность полосы (см. пример 1) по эффективным коэффициентам концентрации напряжений $\sigma_т = 315$ МПа.

В прикреплении лобовыми и фланговыми швами стальной полосы принимаем $K_э=3$; коэффициент запаса прочности $k=1,2$.

По диаграмме Смита $\sigma_r=\sigma_т$, поэтому

$$[\sigma]_p = \frac{\sigma_т}{kK_э} = \frac{315}{1,20 \cdot 3} = 87,5 \text{ МПа}.$$

Допускаемое усилие на полосу

$$P_1 = [\sigma]_p A = 87,5 \cdot 20 \cdot 10^{-4} = 0,175 \text{ МН}.$$

Допускаемое усилие по способу эффективных коэффициентов концентрации оказалось больше, чем по расчету примера 1.

Контрольные вопросы к главе 5

1. Что называется пределом выносливости?
2. Как определяется предел выносливости?
3. В каких координатах строят кривые для определения предела выносливости?
4. Изобразите схематически диаграмму прочности материала в зависимости от количества загружений.
5. Что называется коэффициентом амплитуды — характеристикой цикла нагружений?
6. Что называется средним циклом нагружения?
7. Что называется амплитудой нагружения?
8. Покажите схемы знакопеременных, пульсирующих, знакопостоянных и симметричных загружений.
9. В каких координатах строят диаграмму Смита?
10. Как строят схематизированную диаграмму Смита?
11. Как определить на диаграмме Смита (см. рис. 5.3) σ_{max} и σ_{min} при $r=-0,5$; $r=0$; $r=0,5$?

12. Каковы величины предела выносливости малоуглеродистой стали при симметричных циклах?
13. То же, конструкционных, низколегированных.
14. Перечислите, от каких факторов зависит предел выносливости.
15. В каких случаях предел выносливости зоны термического влияния понижается по сравнению с основным металлом, удаленным от нее?
16. Сварные соединения каких сталей чувствительны к концентраторам напряжения — малоуглеродистых или низколегированных?
17. Как влияет качество технологического процесса сварки на предел выносливости швов, сваренных встык?
18. От каких факторов зависит предел выносливости соединений втавр?
19. То же, внахлестку.
20. Какие виды сварных соединений лучше воспринимают повторно-переменные нагрузки — встык или с угловыми швами?
21. При каких характеристиках циклов концентраторы особенно интенсивно снижают предел выносливости?
22. Что называется эффективным коэффициентом концентрации напряжений?
23. Может ли быть $K_в > K_т$?
24. Какие конструкции лучше работают под переменными нагрузками — имеющие большие или малые значения $K_в$?
25. Соединения каких сталей имеют более высокие коэффициенты $K_в$ — низколегированных или малоуглеродистых?
26. Как повышают предел выносливости соединений термообработанных сталей?
27. Как повышают предел выносливости соединений малоуглеродистых сталей?
28. В каких соединениях более эффективно применение поверхностей обработки — имеющих большие или малые концентраторы?
29. Как можно повысить предел выносливости соединений применением местного нагрева?
30. Каковы типовые формы разрушений при переменных нагрузках стыковых швов?
31. То же, угловых лобовых швов без дефектов.
32. То же, в соединениях с фланговыми швами.
33. То же, при сварке встык термообработанных сталей.
34. Каково рациональное оформление стыковых швов при переменных нагрузках?
35. То же, угловых швов.
36. Повышается ли предел выносливости соединений после отжига?
37. Как влияют остаточные напряжения на предел выносливости?
38. Какова усталостная прочность в соединениях при контактной стыковой сварке?
39. Как работают под переменной нагрузкой связующие и рабочие точечные соединения?
40. Чем объясняется низкий предел выносливости точечных соединений?
41. Как влияет на предел выносливости точек характеристика цикла?

42. Как влияет ширина образца и количество точек в продольном ряду на предел выносливости?
43. Как влияют внешние и внутренние дефекты точки на предел выносливости?
44. Какие эффективные коэффициенты концентрации имеют точечные соединения? Какими путями повышается их предел выносливости?
45. Как определяют допускаемые напряжения в сварных соединениях при переменных нагрузках по СНиПу?
46. Чем объясняются высокие значения предела выносливости соединений, сваренных электронно-лучевой, плазменной, диффузионной сваркой?

ГЛАВА 6

СВАРОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ, ДЕФОРМАЦИИ И ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

§ 6.1. ОБРАЗОВАНИЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ СВАРКЕ

Основные понятия и классификация. В теории сварочных деформаций и напряжений принято использовать расположение осей координат, показанное на рис. 6.1. Ось Ox направлена вдоль шва; Oy — поперек шва в плоскости пластины; Oz — поперек шва в направлении толщины. Соответственно различают напряжения σ_x, σ_y, σ_z, τ_{xy}, τ_{yz}, τ_{zx}; деформации ε_x, ε_y, ε_z, γ_{xy}, γ_{yz}, γ_{zx} и перемещения точек тела u по оси Ox; v — по оси Oy; w — по оси Oz.

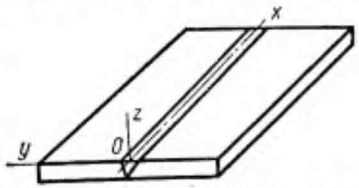


Рис. 6.1. Расположение координатных осей в пластине

Расширение и сокращение металла от неравномерного нагрева или охлаждения, а также от структурных превращений образуют так называемые собственные или внутренние деформации и напряжения при сварке. В отличие от напряжений и деформаций, создаваемых нагрузками, собственные напряжения и деформации существуют в теле при отсутствии каких-либо нагрузок.

Собственные напряжения — это такие напряжения, которые существуют в теле при отсутствии приложенных к нему поверхностных или объемных (инерционных, гравитационных) сил.

Чтобы более ясно понимать причины образования собственных напряжений, рассмотрим различные виды деформаций металла.

1. Температурные деформации ε_α вызваны изменением размера частиц тела при изменении температуры. К температурным деформациям условно относят также деформации, возникающие в процессе структурных превращений:

$$\varepsilon_\alpha = \alpha T, \tag{6.1}$$

где α — средний коэффициент линейного расширения в интервале изменения температуры от 0 до T, включающий в себя и влияние структурных превращений, $°C^{-1}$; T — изменение температуры в какой-либо точке тела, °С.

Сдвиговые температурные деформации γ_α в изотропных телах не возникают.

2. Наблюдаемые деформации $\varepsilon_н$ и $\gamma_н$ характеризуют изменения размеров тела — линейных и угловых, которые можно зарегистрировать измерительными приборами. В теории упругости и пластичности их называют деформациями, не присваивая им никакого индекса.

3. Собственные (внутренние) деформации состоят из упругих $\varepsilon_{упр}$, $\gamma_{упр}$ и пластических $\varepsilon_{пл}$, $\gamma_{пл}$.

Указанные виды деформаций связаны между собой следующими соотношениями:

$$\varepsilon_н = \varepsilon_{упр} + \varepsilon_{пл} + \varepsilon_\alpha; \tag{6.2}$$

$$\gamma_н = \gamma_{упр} + \gamma_{пл}. \tag{6.3}$$

Если до процесса нагрева или охлаждения в точке тела возникли начальные пластические деформации $\varepsilon_{0_{пл}}$ и $\gamma_{0_{пл}}$, вызванные предшествующими деформациями, то формулы (6.2) и (6.3) примут следующий вид:

$$\varepsilon_н = \varepsilon_{упр} + \Delta\varepsilon_{пл} + \varepsilon_\alpha + \varepsilon_{0_{пл}}; \tag{6.4}$$

$$\gamma_н = \gamma_{упр} + \Delta\gamma_{пл} + \gamma_{0_{пл}}, \tag{6.5}$$

где $\Delta\varepsilon_{пл}$ и $\Delta\gamma_{пл}$ — приращения пластических деформаций на стадии рассматриваемого процесса.

Собственные напряжения классифицируются по различным признакам. По причине, их вызвавшей, они делятся на напряжения: от упругого или пластического механизма деформирования при сборке, монтаже и правке; от упругих и пластических деформаций из-за неравномерного нагрева деталей; от неравномерного изменения объема тела при фазовых превращениях. По времени существования они могут

быть временными, существующими в период выполнения технологической операции или протекания физического процесса, и остаточными, устойчиво сохраняющимися в течение длительного периода. Собственные напряжения бывают одноосными (линейными), двухосными (плоскостными) и трехосными (объемными). В зависимости от объема, в пределах которого напряжения взаимно уравновешены, они называются напряжениями первого рода (макрообъем), второго рода (зерно) и третьего рода (кристаллическая решетка).

Собственные напряжения первого рода могут быть выражены через упругие деформации:

$$\sigma_x = 2G\left(\varepsilon_{x_{упр}} + \frac{3\mu}{1-2\mu}\varepsilon_0\right); \quad \sigma_y = 2G\left(\varepsilon_{y_{упр}} + \frac{3\mu}{1-2\mu}\varepsilon_0\right);$$

$$\sigma_z = 2G\left(\varepsilon_{z_{упр}} + \frac{3\mu}{1-2\mu}\varepsilon_0\right);$$

$$\tau_{xy} = G\gamma_{xy_{упр}}; \quad \tau_{yz} = G\gamma_{yz_{упр}}; \quad \tau_{zx} = G\gamma_{zx_{упр}}, \tag{6.6}$$

где $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$; $\quad \varepsilon_0 = \frac{\varepsilon_{x_{упр}} + \varepsilon_{y_{упр}} + \varepsilon_{z_{упр}}}{3}$.

Свойства металлов при высоких температурах. Для вычисления собственных напряжений довольно часто приходится использовать характеристики свойств металлов при высоких температурах.

Таблица 6.1

Теплофизические свойства некоторых металлов

Материал	$\alpha \cdot 10^{-6}$, K^{-1}	$T_{ср}$ °C для λ, $c\gamma$, a	λ, Вт/(м·К)	$c\gamma$, МДж/(м³×К)	a, см²/с
Низкоуглеродистые и низколегированные стали	12...16 (16,5...17) *	500...600	38...42	4,9...5,2	0,075...0,09
Аустенитные хромоникелевые стали	16...20	600	25...33	4,4...4,8	0,053...0,07
Алюминий	23...27	300	270	2,7	1,0
Технический титан	8,5	700	17	2,8	0,06

* Средний коэффициент линейного расширения α' в диапазоне температур 0...1000 °С, при определении которого исключено сокращение металла вследствие структурного превращения.

Теплофизические характеристики, такие, как объемная теплоемкость $c\gamma$, теплопроводность λ и температуропроводность a, берут обычно средними в необходимом интервале температур. В табл. 6.1 указаны их значения для случая сварки металлов. Коэффициенты линейного расширения α также обычно берут средними в некотором диапазоне температур. Однако в ряде случаев приходится пользоваться дилатограммами — экспериментально полученными графиками изменения линейного размера образца от температуры (рис. 6.2). В металлах, не испытывающих структурных

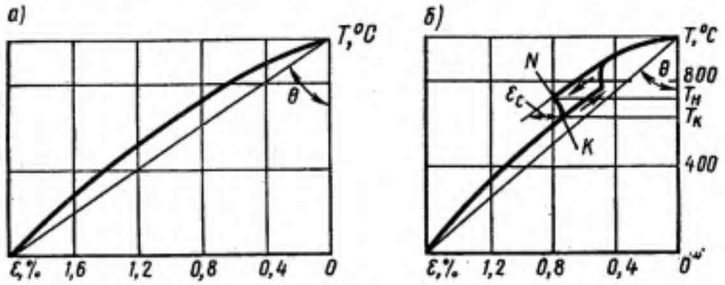


Рис. 6.2. Дилатограммы металлов без структурных превращений (*а*) и со структурными превращениями (*б*)

превращений, изменение длины образца происходит монотонно (рис. 6.2, *а*), поэтому используют не мгновенное значение $\alpha = d\varepsilon/dT$, а принимают $\alpha = \varepsilon/T = \operatorname{tg}\theta$. В металлах со структурными превращениями, например в углеродистых и легированных сталях, график имеет сложный характер (рис. 6.2, *б*). При охлаждении металла от максимальной температуры нагрева до точки N — начала структурного превращения — происходит монотонное сокращение образца, а затем, несмотря на снижение температуры, его удлинение. После завершения структурного превращения (точка K) образец вновь начинает сокращаться. Положение точек начала $T_н$ и конца $T_к$ структурных превращений зависит от химического состава металла и термического цикла охлаждения (скорости охлаждения). Чем выше скорость охлаждения, тем ниже $T_н$ и $T_к$. От состава металла и скорости охлаждения зависит также деформация структурного превращения $\varepsilon_с$.

В расчетах сварочных деформаций и напряжений часто используют коэффициент α и обобщенную характеристику $\alpha/c\gamma$. В приближенных расчетах, не связанных с учетом структурных превращений, достаточно пользоваться средними значениями α (см. табл. 6.1). Обобщенная характеристика $\alpha/c\gamma$ мало изменяется в зависимости от температуры. На рис. 6.3, *а*, *б* показаны для низкоуглеродистой и для

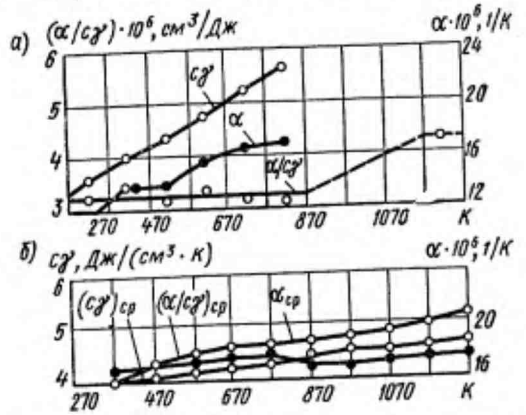


Рис. 6.3. Зависимости α, $c\gamma$ и $\alpha/c\gamma$ от температуры: $\alpha_{ср}$, $(c\gamma)_{ср}$ и $(\alpha/c\gamma)_{ср}$ — средние значения от $T=270$ К до соответствующей температуры T:
а — низкоуглеродистая сталь типа Ст3; *б* — хромоникелевая сталь типа 18-8

хромоникелевой стали типа 18-8 зависимости α, $c\gamma$ и $\alpha/c\gamma$ от температуры, вычисленные как средние значения в диапазоне от $T=270$ К до соответствующей температуры T.

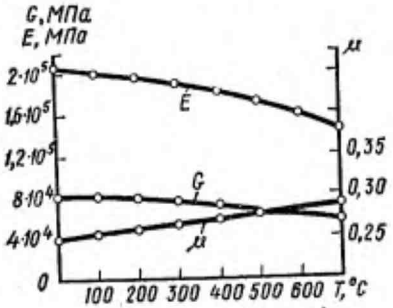


Рис. 6.4. Зависимость модулей упругости E, G и коэффициента Пуассона μ от температуры для стали 25

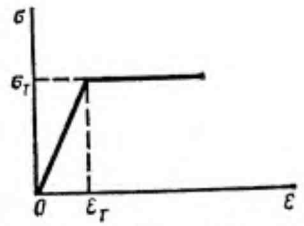


Рис. 6.5. Диаграмма зависимости напряжения от деформации для идеального упругопластического металла

Механические свойства металла также зависят от температуры. Модули упругости E и сдвига G снижаются с ро-

стом температуры, в то время как коэффициент Пуассона μ несколько возрастает (рис. 6.4). Характер зависимости напряжения σ от деформации ε при растяжении образца изменяется сложно при повышении температуры. Когда материал рассматривают как идеальный упругопластический (рис. 6.5), диаграмма может быть описана лишь двумя

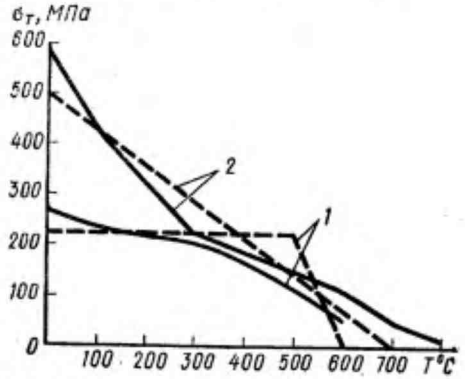


Рис. 6.6. Зависимость предела текучести металлов от температуры:
1 — низкоуглеродистая сталь; *2* — титановый сплав

характеристиками — модулем упругости E и пределом текучести $\sigma_т$: $\varepsilon_т=\sigma_т/E$.

На рис. 6.6 представлены графики зависимости $\sigma_т$ от температуры для некоторых металлов (сплошные линии). Иногда эти сложные графики заменяют схематизированными (пунктирные линии). Для низкоуглеродистой стали предел текучести при изменении температуры от 0. . .500 °С принимают постоянным, а затем понижающимся до 0 при $T=600$ °С. В действительности и при $T>600$ °С предел текучести металла не равен нулю. Для титанового сплава изменение $\sigma_т$ принимают в виде одной прямой линии.

Образование напряжений и деформаций при нагреве и остывании. Изучение собственных напряжений при сварке целесообразно начинать с простейших примеров. Рассмотрим изменение напряжения при нагреве стержня, закрепленного по концам (рис. 6.7, *а*), до 500 °С и последующем его охлаждении. Будем полагать, что модуль упругости E и предел текучести $\sigma_т$ для низкоуглеродистой стали изменяются непрерывно с повышением температуры (см. рис. 6.4 и 6.6). Материал идеальный упругопластический (см. рис. 6.5). Напряжения сжатия на рис. 6.6, *б* будем откладывать вниз, а напряжения растяжения — вверх; полные деформации удлинения, равные сумме упругих и пластических,— вправо, а деформации укорочения — влево. Для определения деформаций будем использовать формулу (6.2), а для определения напряжений — формулу

$$\sigma = E\varepsilon_{упр}. \qquad (6.7)$$

В закрепленном по концам стержне наблюдаемая деформация $\varepsilon_н$ равна нулю. Поэтому из (6.2) для полной собственной деформации

$$\varepsilon = \varepsilon_{упр} + \varepsilon_{пл} = -\varepsilon_\alpha. \qquad (6.8)$$

Так как при нагреве $\varepsilon_\alpha>0$, то согласно (6.8) $\varepsilon=\varepsilon_{упр}+\varepsilon_{пл}<0$. Поэтому кривая из точки 0 идет вниз влево.

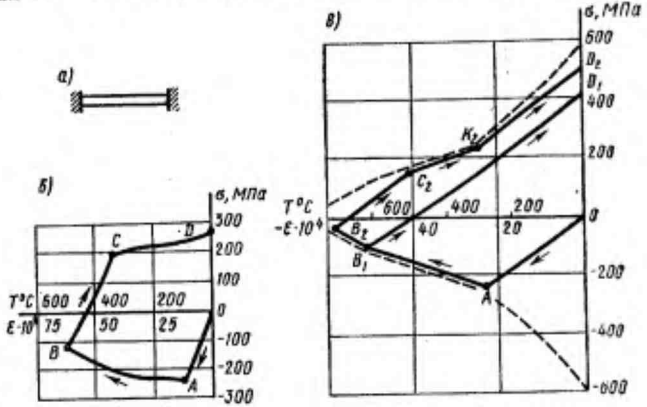


Рис. 6.7. Образование напряжений в стержне с жестко заделанными концами:
а — схема испытания; *б* — напряжения и деформации на стержне из низкоуглеродистой стали; *в* — напряжения и деформации в стержне из титанового сплава

В расчетах используется действительная зависимость $\sigma_т$ от температуры, показанная сплошной линией *1* (см. рис. 6.6), изменение модуля упругости E происходит, как показано на рис. 6.4, коэффициент линейного расширения α принимаем не зависящим от температуры в диапазоне 0. . .600 °С и равным $12\cdot10^{-6}$ °С$^{-1}$; отсчет температур ведется от 0 °С. Пока напряжение σ не достигнет предела текучести в некоторой точке A, соответствующей температуре примерно 100 °С, пластических деформаций нет. Участок OA не является прямой линией потому, что по мере повышения температуры модуль упругости E несколько уменьшается и согласно (6.7) напряжения не зависят линейно от $\varepsilon_{упр}$.

В точке A напряжения достигают предела текучести. При дальнейшем повышении температуры напряжение $\sigma_т$, хотя полная деформация $\varepsilon=-\varepsilon_\alpha$, возрастает. На участке AB вследствие падения $\sigma_т$ напряжение снижается. В точке B нагрев стержня прекращается. В стержне имеются пластические деформации $\varepsilon_{плB}$, равные, согласно (6.8),

$$\varepsilon_{плB}=-\varepsilon_{\alpha B}-\varepsilon_{упрB}, \qquad (6.9)$$

где $\varepsilon_{упрB}=-\sigma_{т_B}/E_B$; $\sigma_{т_B}$ и E_B — предел текучести и модуль упругости металла при температуре T_B.

При охлаждении отсчет пластических деформаций $\varepsilon_{пл}$ на стадии остывания стержня следует начать заново. Пластические деформации $\varepsilon_{плB}$ в формуле (6.4) будут играть роль начальных деформаций $\varepsilon_{0_{пл}}$. Так как наблюдаемая деформация равна нулю, имеем

$$\varepsilon_{упр}+\Delta\varepsilon_{пл}=-\varepsilon_\alpha-\varepsilon_{0_{пл}}=\varepsilon. \qquad (6.10)$$

На участке BC напряжения изменят знак и, пока полная деформация $\varepsilon<\sigma_т/E$, пластические деформации отсутствуют, т. е. $\Delta\varepsilon_{пл}=0$. В точке C появляются пластические деформации и далее вплоть до полного охлаждения (точка D) напряжения остаются равными пределу текучести металла при соответствующей температуре согласно кривой *1* (см. рис. 6.6). После полного остывания $\varepsilon_\alpha=0$. Остаточная пластическая деформация равна алгебраической сумме пластической деформации, возникшей при нагреве, и приращения пластической деформации, возникшей при остывании. Согласно формуле (6.9), с учетом $\varepsilon_\alpha=0$, получим

$$\varepsilon_{0_{пл}}+\Delta\varepsilon_{пл_D}=-\varepsilon_{упр_D}=-\sigma_{т_D}/E_D. \qquad (6.11)$$

Остаточная пластическая деформация отрицательна (деформация укорочения). Действительно, если конец растянутого стержня освободить от закрепления, то стержень сократится по длине на размер $\sigma_{т_D}/E_D$. В случае жестко заделанного стержня упругая деформация совпадает по абсолютному значению с пластической деформацией. В случае нежесткой заделки упругая и пластическая деформации обычно не равны друг другу.

Следует обратить внимание на то, что в случае жестко заделанного по концам стержня, согласно формуле (6.8), по горизонтальной оси на рис. 6.7, *б* откладывается температурная деформация $\varepsilon_\alpha=\alpha T$. Если считать значение α в некотором интервале температур постоянным, то горизонтальную ось можно рассматривать в некотором масштабе и как ось температур.

Рассмотрим аналогичный процесс нагрева стержня из титанового сплава, изменение предела текучести которого показано на рис. 6.6 и в виде пунктирной линии на рис. 6.7, *в*. Для титанового сплава проведем построения, аналогичные проведенным для стали (см. рис. 6.7, *б*). Закономерность снижения модуля упругости E с температурой у титанового сплава примерно такая же, как у низкоуглеродистой стали, но значение его у титанового сплава в два раза меньше. Коэффициент линейного расширения, согласно табл. 6.1, примем $8{,}5\cdot10^{-6}$ °C^{-1}. Напряжения при нагреве достигают предела текучести в точке A при температуре около 300 °C. На участке AB_1 будут протекать пластические деформации *. Если процесс нагрева прерывать при температуре около 600 °C и далее стержень охладить, то напряжения на всем участке B_1D_1 нигде не станут равными пределу текучести. Если нагрев завершить при $T\approx700$ °C в точке B_2, то при охлаждении в точке C_2 возникают пластические деформации, которые, однако, прекращаются в точке K_2, так как приращение температурной деформации $\Delta\varepsilon_\alpha$ будет меньше приращения $\Delta\varepsilon_т=\Delta\sigma_т/E$, т. е. $\partial\varepsilon_\alpha/\partial T<\partial\varepsilon_т/\partial T$. В этом случае напряжения в стержне хотя и растут, следуя линии K_2D_2, но остаются ниже предела текучести металла, в том числе и после полного остывания в точке D_2.

В рассмотренных выше случаях стержень был помещен между двумя абсолютно жесткими стенками (рис. 6.7, *а*) и поэтому наблюдаемая деформация $\varepsilon_н$ была равна нулю. В свариваемых пластинах волокна металла не находятся в условиях жесткой заделки, так как соседние участки металла могут деформироваться. Реальному поведению металла в свариваемых деталях лучше соответствует модель стержня, конец которого прикреплен к пружине, заделанной в жесткую опору. На рис. 6.8, *а* пружина не напряжена. Если стержень нагреть (рис. 6.8, *б*), то он удлинится, но наблюдаемая деформация $\varepsilon_н$ окажется меньше температурной деформации ε_α, так как пружина оказывает сопротивление свободному расширению стержня. Собственная деформация, равная разности наблюдаемой и температурной $\varepsilon_н-\varepsilon_\alpha$, будет отрицательной, что указывает на наличие в стержне сжимающих напряжений. Если эти сжимающие

* Для наглядности на рис. 6.7, *в* сплошные и пунктирные линии там, где они совпадают, изображены рядом.

напряжения достигнут предела текучести, то в стержне будет протекать пластическая деформация осадки. После полного остывания (рис. 6.8, *в*) стержень окажется короче, чем он был вначале. Однако пружина не даст стержню занять положение, обозначенное точкой *A*. По отношению к начальному положению в стержне будут: *пластическая деформация укорочения* $\varepsilon_{пл}$, возникшая при нагреве и имеющая отрицательный знак; *наблюдаемая отрицательная деформация* $\varepsilon_{н}$; *положительная* (по отношению к точке *A*) *упругая деформация* $\varepsilon_{упр}$, которая вызовет в стержне остаточные напряжения растяжения $\sigma = E\varepsilon_{упр}$.

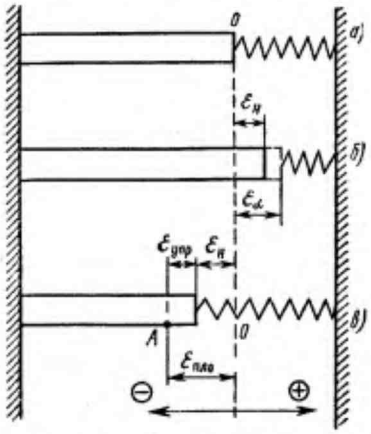


Рис. 6.8. Деформация стержня, скрепленного с пружиной

Выше были рассмотрены примеры определения напряжений в стержнях, жестко закрепленных по концам. В некоторых простейших случаях напряжения при сварке могут быть определены точно таким же способом. Например, с использованием гипотезы плоских сечений могут быть просто определены напряжения в очень широкой пластине, по кромке которой перемещается источник нагрева (рис. 6.9, *а*). Поперечные сечения *I*, *II*, *III* принимаем не искривляющимися и не перемещающимися относительно друг друга. Рассматриваем только напряжения σ_x. В продольных сечениях *1*, *2* и *3* будут разные термические циклы, показанные на рис. 6.9, *б*. . .*г*. Временные напряжения σ_x будут зависеть от температуры и характера ее изменения. На рис. 6.9, *б* в области высоких температур, когда предел текучести близок к нулю, напряжения на участке *AB* отсутствуют, далее появляются растягивающие напряжения, которые достигают предела текучести. На рис. 6.9, *в* напряжения сжатия в сечении *2* на участке *CD* равны пределу текучести, затем меняют знак, но в процессе остывания металла не достигают предела текучести. В сечении *3* максимальные температуры незначительны, напряжения сжатия не вызывают пластической деформации (рис. 6.9, *г*), и после полного остывания напряжения σ_x в

этой точке отсутствуют. Эпюра остаточных напряжений σ_x в поперечном сечении показана на рис. 6.9, *д*.

Расчетное определение собственных напряжений. Более сложным является определение сварочных напряжений в случае, когда искривлением сечений можно пренебречь, но взаимные перемещения поперечных сечений в процессе сварки относительно друг друга необходимо учитывать.

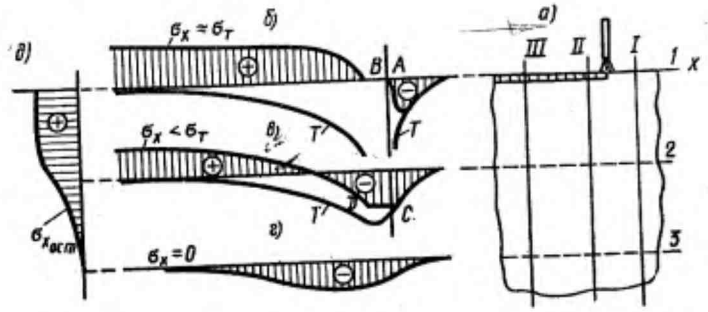


Рис. 6.9. Образование временных и остаточных напряжений при нагреве кромки широкой пластины движущимся источником теплоты

Для определения сварочных напряжений в сталях в этих случаях могут быть использованы простейшие графорасчетные методы Г. А. Николаева и Н. О. Окерблома. В этих методах приняты следующие допущения.

1. Рассматривают только продольные напряжения σ_x. Поперечные напряжения σ_y и касательные τ_{xy} считают равными нулю.

2. Поперечные сечения плоские, но могут перемещаться относительно друг друга.

3. Зависимость предела текучести для низкоуглеродистой стали схематизирована по типу, показанному пунктирной линией *1* (см. рис. 6.6).

4. Материал идеальный упругопластический (см. рис. 6.5).

5. Модуль упругости *E* постоянен во всем диапазоне температур.

6. Свариваемые пластины, каждая шириной *B*, считают достаточно длинными (рис. 6.10, *б*), чтобы можно было использовать квазистационарное распределение температур; температура по толщине пластин распределена равномерно.

На рис. 6.10, *б* показано квазистационарное распределение температур при сварке длинных в направлении *x—x* пластин. В методе Г. А. Николаева рассматриваются деформации и напряжения только в двух сечениях пластины; в сечении *1—1*, соответствующем наибольшей ширине изотермы 600 °С, и в сечении *2—2* после полного остывания пластины (сечение *2—2* на рисунке не показано). Считается, что свариваемые встык пластины собраны на прихватках и относительно друг друга не поворачиваются, т. е. это соответствует случаю укладки шва на целую пластину шириной $2B$.

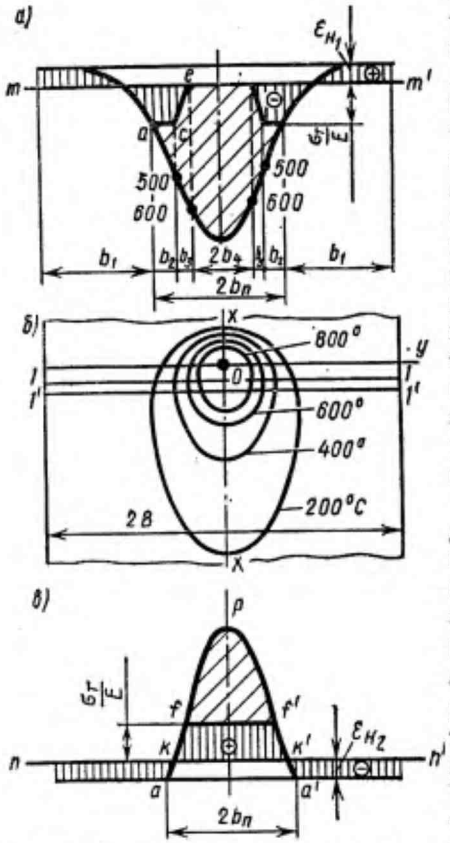


Рис. 6.10. Определение одноосных сварочных напряжений графорасчетным методом Г. А. Николаева:

а — эпюра продольных деформаций в сечении *1—1*; *б* — поле температур при сварке; *в* — эпюра продольных деформаций, возникших на стадии остывания

Рассмотрим распределение собственных напряжений и деформаций в сечении *1—1*, используя равенство (6.4). Перед сваркой начальные деформации $\varepsilon_{0_{пл}}$ были равны нулю, а температурные в рассматриваемом сечении $\varepsilon_\alpha=\alpha T$. Тогда, перенося в левую часть $\varepsilon_{упр}+\varepsilon_{пл}$, а в правую часть $\varepsilon_н$ и меняя знак, получаем

$$\varepsilon_{упр_1}+\Delta\varepsilon_{пл_1}=\varepsilon_{н_1}-\varepsilon_{\alpha_1}=\varepsilon_{н_1}-\alpha T. \quad (6.12)$$

Решим уравнение (6.12) графически. Возьмем рядом с сечением *1—1* второе сечение *1'—1'*, находящееся от него на расстоянии, равном единице. Температурная деформация выделенной полоски в направлении *Ox* составит αT. Отложим значения величины $-\alpha T$, находящейся в правой части уравнения (6.12), в виде толстой кривой линии вниз как отрицательные (см. рис. 6.10, *а*). Теперь необходимо определить $\varepsilon_{н_1}$. Согласно допущению *2*, поперечные сечения не искривляются, поэтому наблюдаемая деформация $\varepsilon_н$ полоски между *1—1* и *1'—1'* будет одной и той же по всей ширине пластины $2B$. Положение линии *m—m'*, определяющей на рис. 6.10, *а* значение $\varepsilon_{н_1}$, можно находить путем подбора методом последовательных приближений, исходя из условия взаимной уравновешенности собственных напряжений в пределах поперечного сечения *1—1*. Как известно, собственные напряжения при одноосном напряженном состоянии пропорциональны упругим деформациям $\sigma=\varepsilon_{упр}E$. Поэтому достаточно получить уравновешенную эпюру упругих деформаций $\varepsilon_{упр}$, чтобы иметь уравновешенность собственных напряжений. Рассмотрим подробно определение упругих и пластических деформаций при произвольно выбранном $\varepsilon_{н_1}$. После того как проведена линия *m—m'*, показывающая предположительное значение $\varepsilon_{н_1}$, вниз от *m—m'* откладывают предельно возможную упругую деформацию $\varepsilon_{упр}=\varepsilon_т=\sigma_т/E$ и проводят горизонтальную линию *ac* ($\varepsilon_т=\text{const}$) до $T=500$ °С (см. рис. 6.6). В диапазоне 500. . .600 °С предел текучести меняется линейно, поэтому на участке *ce* упругая деформация убывает до нуля и остается нулевой при $T\geqslant 600$ °С.

На рис. 6.10, *а* вертикально заштрихована эпюра упругих деформаций; косо — эпюра пластических деформаций. Если окажется, что эпюра упругих деформаций уравновешена, т. е. $\int_{-B}^{B}\varepsilon_{упр}\,dy=0$, то $\varepsilon_{н_1}$ выбрана удачно. Если нет, то нужно задаваться новым положением линии *m—m'* и повторить построение.

Наблюдаемая деформация $\varepsilon_{н_1}$ на рис. 6.10, *а* оказалась положительной и это означает, что пластина в процессе нагрева при сварке удлиняется. Упругие деформации удлинения показаны со знаком плюс, а деформации укорочения — со знаком минус. Зоны шириной b_1 испытывают только упругие деформации, зоны b_2 и b_3 — упругие и пластические, а зона b_4 — только пластические деформации. Зоны b_2, b_3 и b_4 составляют так называемую зону пластических деформаций $2b_п$.

Для определения остаточных деформаций и напряжений нужно рассмотреть стадию остывания пластины, т. е. перейти от распределения деформации в сечении *1—1* к распределению деформаций в некотором сечении *2—2*, условно

находящемся при температуре, равной 0 °С. Для этого следует воспользоваться уравнением (6.4), в котором в качестве начальных деформаций будут присутствовать пластические деформации, найденные в сечении *1—1*. По отношению к состоянию в сечении *2—2* состояние в сечении *1—1* является начальным.

Перепишем уравнение (6.4) в другом виде, введя индексы для рассматриваемого состояния:

$$\varepsilon_{\text{упр}_2} + \Delta\varepsilon_{\text{пл}_2} = \varepsilon_{\text{н}_2} - \varepsilon_{\alpha_2} - \varepsilon_{0\text{пл}_2}. \qquad (6.13)$$

Так как после полного остывания $T=0$ °С, то $\varepsilon_{\alpha_2}=0$.

Для определения упругих и пластических деформаций $\Delta\varepsilon_{\text{пл}_2}$ воспользуемся графическим методом. Отложим на рис. 6.10, *в* в виде толстой линии эпюру $-\varepsilon_{0\text{пл}_2}$. Начальные деформации $\varepsilon_{0\text{пл}_2}=\Delta\varepsilon_{\text{пл}_1}$ в сечении *1—1*. Так как пластические деформации $\Delta\varepsilon_{\text{пл}_1}$ были деформациями укорочения волокон металла при нагреве и имеют знак минус, то $-\varepsilon_{0\text{пл}_2}=-\Delta\varepsilon_{\text{пл}_1}$ будет положительной, поэтому она отложена вверх. Искомая деформация $\varepsilon_{\text{н}_2}$ будет одинакова по всей ширине пластины, так как принята гипотеза плоских сечений. Далее необходимо задаться некоторой отрицательной величиной $\varepsilon_{\text{н}_2}$, сдвинув начало координат на линию $n—n'$. Ординаты кривой $kfpf'k'$ выражают левую часть равенства (6.13), т. е. сумму упругих и приращений пластических деформаций, соответствующих стадии остывания. Чтобы получить отдельно значения упругой и пластической составляющих, необходимо воспользоваться пределом текучести $\sigma_\text{т}$ при комнатной температуре и определить максимально возможную упругую деформацию $\varepsilon_{\text{упр}_{2\max}}=\varepsilon_\text{т}$. Отложим $\varepsilon_\text{т}=\sigma_\text{т}/E$ на рис. 6.10, *в*. Тогда косо заштрихованная часть fpf' будет выражать приращения пластических деформаций удлинения $\Delta\varepsilon_{\text{пл}_2}$; возникших при остывании, а вертикально заштрихованная часть эпюры — упругие деформации. Если окажется, что $\int_{-B}^{B} \varepsilon_{\text{упр}_2}\,dy = 0$, то положение линии $n—n'$ выбрано удачно. Если эпюра упругих деформаций, пропорциональных остаточным напряжениям, не уравновешена, то следует задаться новым положением $n—n'$, т. е. новым $\varepsilon_{\text{н}_2}$. Остаточные пластические деформации $\varepsilon_{\text{пл. ост}}$ равны алгебраической сумме пластических деформаций при нагреве $\Delta\varepsilon_{\text{пл}_1}$ и приращений пластических деформаций при остывании $\Delta\varepsilon_{\text{пл}_2}$ (эпюра $aff'a'$):

$$\varepsilon_{\text{пл. ост}} = \Delta\varepsilon_{\text{пл}_1} + \Delta\varepsilon_{\text{пл}_2}. \qquad (6.14)$$

Так как в рассматриваемом случае $\Delta\varepsilon_{\text{пл}_1}$ по модулю больше $\Delta\varepsilon_{\text{пл}_2}$, то знак $\varepsilon_{\text{пл. ост}}$ совпадает со знаком $\Delta\varepsilon_{\text{ул}_1}$. Это означает, что остаточные пластические деформации представляют собой деформации укорочения.

Метод Г. А. Николаева позволяет получить распределение остаточных напряжений $\sigma_{\text{ост}}=\varepsilon_{\text{упр}_2}E$ и относительное укорочение сваренной пластины $\varepsilon_{\text{н}_2}$. Как следует из расчета, максимальные остаточные напряжения в низкоуглеродистой стали являются растягивающими, равны пределу текучести и наблюдаются в зоне шва и зоне термического влияния нагревающейся до сравнительно высоких температур. В основном металле, где температура была ниже (200. . .300 °С), остаточные напряжения — сжимающие.

В методе Н. О. Окерблома определение деформаций и напряжений производится в нескольких последовательно расположенных друг за другом сечениях, что позволяет проследить изменение упругих и пластических деформаций в процессе сварки. В первом сечении начальные деформации принимаются равными нулю. В последующих сечениях в качестве начальных деформаций $\varepsilon_{0\text{пл}}$ присутствуют пластические деформации, полученные для предыдущего сечения. Уравнение (6.12) преобразуется к следующему виду для n-го сечения:

$$\varepsilon_{\text{упр}_n} + \Delta\varepsilon_{\text{пл}_n} = \varepsilon_{\text{н}_n} - \varepsilon_{\alpha_n} - \varepsilon_{0\text{пл}_n}, \qquad (6.15)$$

где начальная деформация $\varepsilon_{0\text{ пл}_n}$ может быть представлена как пластическая деформация, накопленная на предыдущих этапах:

$$\varepsilon_{0\text{пл}_n} = \varepsilon_{\text{пл}_{n-1}} = \sum_{1}^{n-1} \Delta\varepsilon_{\text{пл}_i}. \qquad (6.16)$$

Переходя от сечения к сечению, можно получить в каждом из них распределение упругих деформаций и напряжений, а также наблюдаемые деформации.

Алгоритм графорасчетных методов относительно несложен. При наличии соответствующей программы расчет напряжений может быть выполнен достаточно быстро на ЭВМ.

При необходимости можно учесть зависимость модуля упругости E от температуры, а также структурные превращения. В последнем случае температурные деформации ε_α берутся непосредственно с дилатограммы (см. рис. 6.2, *б*) при соответствующих температурах.

Точное определение напряжений и деформаций при сварке проводят методами теории пластичности [3], как

правило, с использованием метода конечных элементов на мощных ЭВМ. Все тело рассматриваемой пластины разбивают на конечные элементы, более мелкие в зоне нагрева и более крупные в малонагретых частях пластины. Процесс сварки разбивают на небольшие отрезки времени. Сначала напряжения и деформации вычисляют в конце первого отрезка времени Δt_1 и находят поле упругих и пластических деформаций. Затем, зная поле пластических деформаций в конце Δt_1 и приращение температурных деформаций на отрезке времени Δt_2, определяют упругие и пластические деформации в конце отрезка времени Δt_2. Решение продолжают до получения установившегося характера напряжений и деформаций при сварке пластины. В этом методе могут быть учтены любые изменения свойств металла, вызванные изменением температуры и пластической деформацией. Метод позволяет получить напряжения σ_x, σ_y, τ_{xy} и все компоненты деформации в элементах пластины.

Аналитические методы решения ввиду сложности сварочных задач большого распространения не получили.

Экспериментальные методы измерения сварочных напряжений. Существуют экспериментальные методы определения остаточных напряжений: рентгеновский, магнитный, ультразвуковой и механические. Чаще используют механические методы, которые основаны на измерении деформаций металла при освобождении его от остаточных напряжений. В качестве измерительных преобразователей перемещений часто используют механические приборы и тензорезисторы, значительно реже — индуктивные и пневматические преобразователи. Рассмотрим пример определения одноосных остаточных напряжений σ_x в сварной пластине (рис. 6.11, *а*). До разрезки пластины на полосы (рис. 6.11, *б*) на ней делают специальные отверстия на расстоянии $Б$ для установки на них механических измерительных приборов или наклеивают тензорезисторы. Размер баз $Б$ несущественен (обычно 10. . .100 мм), так как предполагают, что напряжения в этом случае достаточно мало изменяются по длине. Чтобы учесть возможный изгиб, снимают показания приборов с двух сторон пластины. Затем пластину режут на полосы шириной b. Проводят последующие измерения, и по разности показаний приборов определяют деформацию ε_x и остаточные напряжения:

$$\sigma_{x_{ост}} = -\varepsilon_x E. \qquad (6.17)$$

Можно вырезать поперечную полоску размером L_1 (рис. 6.11, *в*), который не должен быть более $b_п$, т. е. полови-

ны ширины зоны пластических деформаций $2b_п$. При этом одноосные напряжения также снимаются достаточно полно.

Для определения двухосных напряжений базы $Б$ квадратики при разрезке нужно брать по возможности меньших размеров (рис. 6.11, *г*) и в общем случае иметь в каждом квадратике не по две, а по три базы (рис. 6.11, *д*) для определения σ_x, σ_y и τ_{xy}. Если есть уверенность, что

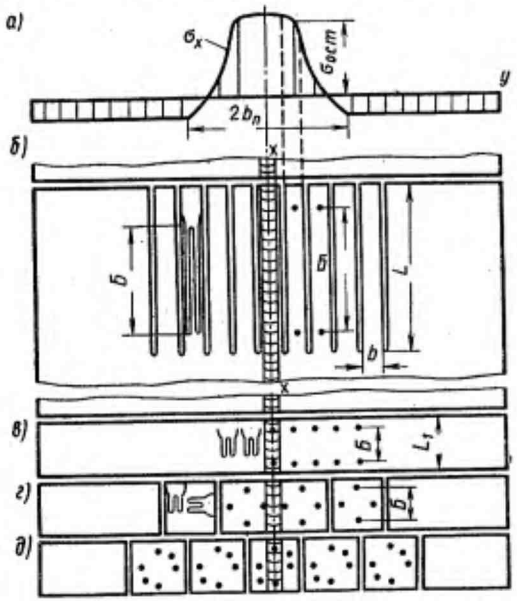


Рис. 6.11. Расположение мерительных баз и тензодатчиков при определении остаточных сварочных напряжений:

а — одноосные напряжения σ_x в пластине; *б* — разрезка на полосы; *в* — вырезка поперечной полосы; *г* — разрезка на квадраты с измерением в двух направлениях; *д* — разрезка на квадраты с измерением в трех направлениях вблизи шва

касательные напряжения τ_{xy} малы, то, чтобы вычислить остаточные напряжения, достаточно измерить возникающие в результате разрезки деформации ε_x и ε_y по двум главным направлениям:

$$\sigma_{x_{ост}} = -E(\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y)/(1-\mu^2);$$
$$\sigma_{y_{ост}} = -E(\varepsilon_y + \mu\varepsilon_x)/(1-\mu^2). \qquad (6.18)$$

Двухосные остаточные напряжения на поверхности массивных тел определяют аналогично описанному выше для пла-

стины. Металл вокруг измеренных баз подрезают кольцевым сверлом или фрезами на глубину, которая составляет не менее 0,6 размера стороны квадрата или диаметра.

Для определения остаточных напряжений в глубине металла сверлят тонкие глубокие отверстия и размещают в них измерительные преобразователи в различных направлениях. Производят начальные измерения, а затем из металла вырезают цилиндры диаметром не менее пяти диаметров отверстий, причем отверстие находится в центре цилиндра. На таком расстоянии напряжения не искажены сверлением отверстия. Повторные измерения позволяют определить необходимые для подсчета трехосных напряжений деформации.

Временные напряжения в процессе сварки определяют, устанавливая на поверхность детали три близко расположенных деформометра, которые непрерывно регистрируют наблюдаемые деформации $\varepsilon_{xн}$, $\varepsilon_{yн}$ и $\gamma_{xyн}$. Зачеканенной в деталь вблизи баз термопарой непрерывно измеряют температуру, затем на дилатометре определяют дилатограмму металла при заданном термическом цикле сварки. Из дилатограммы получают закон изменения температурной деформации ε_α во времени, а по разностям $\varepsilon_{xн}-\varepsilon_\alpha$ и $\varepsilon_{yн}-\varepsilon_\alpha$ находят закон изменения собственных деформаций. Разбивая весь процесс на отдельные отрезки времени Δt и получая приращения собственных деформаций $\Delta\varepsilon_x$, $\Delta\varepsilon_y$ и $\Delta\gamma_{xy}$ на каждом из этих отрезков, методами теории пластичности вычисляют временные напряжения [3].

§ 6.2. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ

Современные представления о распределении собственных напряжений в сварных соединениях сложились на основе экспериментальных и расчетных данных. Поля этих напряжений крайне многообразны и изменчивы от случая к случаю. Наиболее стабильный характер имеют остаточные напряжения вдоль швов σ_x. В образцах толщиной до 15. . .20 мм, сваренных за 1. . .3 прохода плавлением, структурные превращения в которых завершаются при высоких температурах, распределение напряжений имеет вид, показанный на рис. 6.12, *а*. . .*г*. В низкоуглеродистых и аустенитных сталях максимальные напряжения σ_x наблюдаются в шве и вблизи него. Они примерно равны пределу текучести. В титановых и алюминиевых сплавах максимальные напряжения могут составлять $(0{,}5. . .0{,}8)\sigma_т$, а иногда и

ниже. Более высокие напряжения возникают при сварке мощными источниками с высокой скоростью. В зоне, несколько меньшей зоны пластических деформаций, действуют растягивающие напряжения. За пределами этой зоны

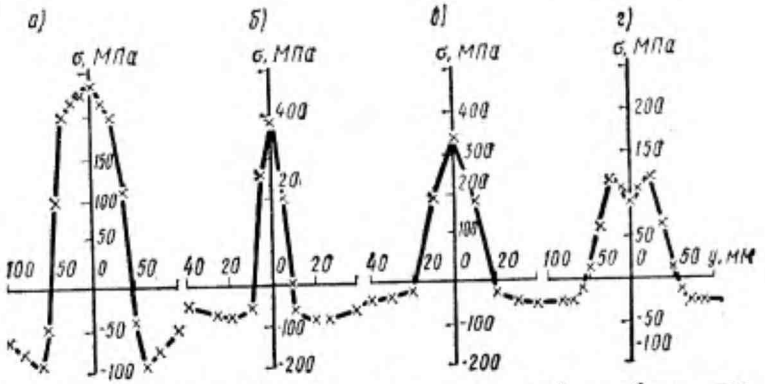


Рис. 6.12. Распределение остаточных напряжений σ_x вблизи шва сварных пластин:

а — низкоуглеродистая сталь Ст3 (s=8 мм); *б* — аустенитная сталь 12Х18Н9Т (s=2) мм; *в* — титановый сплав ОТ4 (s=1,5 мм); *г* — алюминиевый сплав АМг6 (s=10 мм)

напряжения обычно сжимающие и мало меняются по ширине пластины. Из-за искривления пластин во время сварки или от изгиба напряжения σ_x вдалеке от оси шва могут быть близкими к нулю или даже растягивающими.

Структурные превращения, если они происходят при температурах ниже 300. . . .400 °С, существенно изменяют характер напряжений в зоне пластических деформаций. Центральная часть — шов и зона термического влияния — испытала при нагреве и остывании структурные превращения (рис. 6.13, *а*), которые завершились при низкой температуре и сопровождались удлинением металла. Здесь возникли напряжения сжатия. При сварке таких сталей аустенитными электродами в шве возникают растягивающие напряжения (рис. 6.13, *б*); в зоне термического влияния, где произошли структурные превращения, имеются напряжения сжатия. В большей части зоны пластических деформаций, где структурные превращения не возникали, действуют напряжения растяжения. За пределами зоны пластических деформаций в основном металле в таких сталях продольные напряжения σ_x, как правило, сжимающие, но могут быть растягивающими (на рис. 6.13, *а* показано

пунктирной линией), если вклад зоны сжатия в центральной части весьма значителен.

Все рассмотренные закономерности распределения напряжений σ_x в стыковых соединениях полностью относятся к соединениям с угловыми швами, выполненными за 1. . .5 проходов,— нахлесточным, тавровым и угловым.

Помимо продольных в сварных однопроходных соединениях возникают также поперечные σ_y и касательные

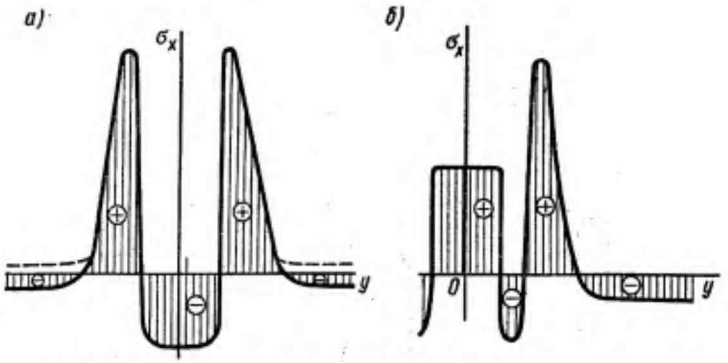


Рис. 6.13. Характер распределения остаточных напряжений в однопроходных сварных соединениях среднелегированных сталей, испытывающих структурные превращения:

а — присадочный металл совпадает с основным металлом; *б* — присадочный металл — аустенитная сталь

τ_{xy} напряжения. Значительные касательные напряжения τ_{xy} образуются в местах высоких градиентов напряжений σ_x и σ_y, т. е. по концам швов.

В швах большой толщины остаточные напряжения зависят от способа выполнения шва и последовательности укладки слоев. В многослойных сварных соединениях из низкоуглеродистых сталей напряжения σ_x в шве близки к $\sigma_т$. Распределение напряжений σ_y в V-образном соединении, которое сваривалось в свободном состоянии, показано кривой *1* на рис. 6.14, *а*. Напряжения σ_y в корне шва при толщинах более 40. . .60 мм велики из-за большой пластической деформации при угловом перемещении. Каждый очередной слой вызывает поперечную усадку и изгиб заваренной части, создавая в корне шва растяжение. Если шов выполняется на пластинах, которые не могут поворачиваться, то каждый новый слой будет вызывать в корне шва только сжатие. В результате появятся большие сжимающие напряжения $\sigma_y > \sigma_т$ в корне шва и растягивающие $\sigma_п \approx 0{,}5\sigma_т$ на поверхности (кривая *2* на рис. 6.14, *а*).

Электрошлаковая сварка, выполняемая за один проход, вызывает в образцах толщиной более 150. . .200 мм объемные напряжения в глубине металла (рис. 6.14, *б*). Все три

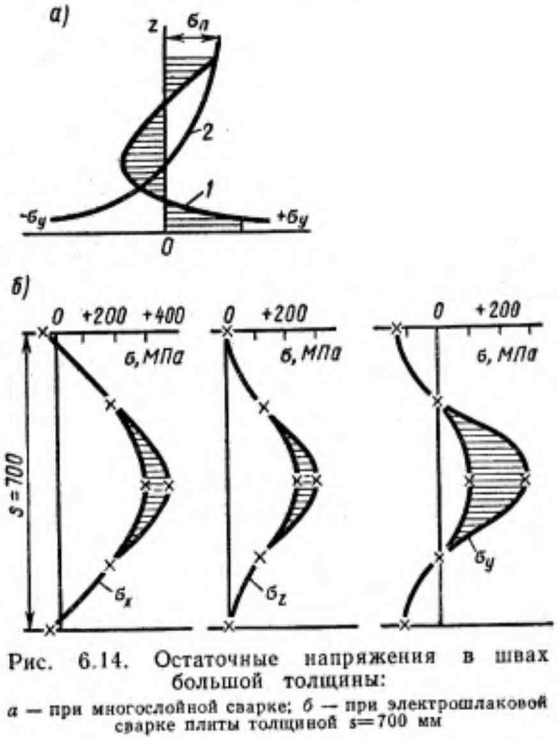


Рис. 6.14. Остаточные напряжения в швах большой толщины:

а — при многослойной сварке; *б* — при электрошлаковой сварке плиты толщиной $s = 700$ мм

компонента напряжений при этом растягивающие, на поверхности σ_x и σ_y — сжимающие. Такой характер напряжений объясняется сопротивлением основного металла усадке зоны сварного соединения как в продольном направлении, так и по толщине, а также неравномерностью распределения температур при сварке: в глубине металл нагрет сильнее, а на поверхности из-за теплоотдачи — слабее. При остывании центральная часть сокращается сильнее и в ней возникает трехосное растяжение.

Круговые швы на плоскости, с помощью которых вваривают различные круглые элементы (рис. 6.15, *а*), имеют осесимметричное распределение напряжений, за исключе-

нием зоны встречи начала и конца шва. В таком соединении следует различать три основных зоны: внутреннюю *1*, среднюю *2* и внешнюю *3*. Зона *2* шириной $2b_п$ соответствует зоне растягивающих напряжений обычного прямолинейного шва; в ней действуют высокие окружные напряжения σ_{t_2}, близкие к пределу текучести (рис. 6.15, *б*). Вследствие уравновешенности напряжений σ_{t_2} с напряжениями σ_r при $r=r_1$ и $r=r_2$ в пределах ширины кольца $2b_п$ (рис. 6.15, *а*, *б*) радиальные напряжения $\sigma_{r_{23}}$, действующие на внешнюю зону *3*, всегда больше напряжений $\sigma_{r_{21}}$, действующих на

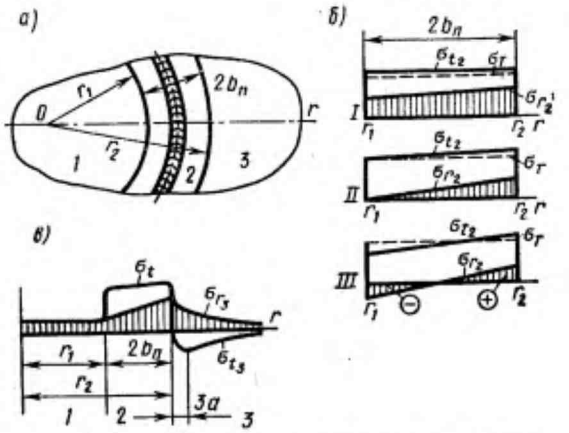


Рис. 6.15. Распределение напряжений в сварных соединениях с круговыми швами

внутреннюю зону. В низкоуглеродистых и аустенитных сталях зона *2* находится в состоянии пластической деформации, что соответствует условию пластичности:

$$\sigma_{r_2}^2+\sigma_{t_2}^2-\sigma_{r_2}\sigma_{t_2}=\sigma_т^2. \qquad (6.19)$$

На рис. 6.15, *б* схематично показано несколько возможных распределений (*I*, *II*, *III*) эпюр напряжений σ_{r_2} и σ_{t_2} в зоне *2*. Напряжения σ_{t_2} и $\sigma_{r_{23}}$ всегда растягивающие, а напряжение $\sigma_{r_{21}}$ может быть и растягивающим, и сжимающим. Это зависит от соотношения поперечной усадки в направлении r и окружной усадки. Поперечная усадка соединения вызывает растягивающие напряжения σ_r и в зоне *1*, и в зоне *3* (рис. 6.15, *в*); окружная усадка вызывает в зоне *3* растяжение напряжением σ_{r_3}, а в области *1* — сжатие. При малых размерах зоны *1* действие поперечной усадки преобладает над окружной усадкой, следовательно, имеем растягивающие напряжения. Аналогичная картина наблюдается, если зона *1* представляет собой жесткое тело (бобышку) или фланец диаметром до 100. . .200 мм. Сжимающие напряжения σ_r в зоне *1* возникают при относительно малой жесткости области *3*, например при приварке узкого кольца. Окружное сокращение почти полностью передается на зону *1*.

Точечные соединения имеют осесимметричное распределение напряжений (рис. 6.16). При остывании центральной части в ней возникают растягивающие напряжения с равными компонентами $\sigma_r=\sigma_t=\sigma_т$. На некотором расстоянии окружные напряжения σ_t становятся сжимающими. Значения радиальных напряжений убывают примерно по закону $1/r^2$, оставаясь растягивающими. В низкоуглеродистых сталях зона двухосного растяжения соответствует участку, нагревающемуся выше температуры 150. . .200 °С. При стыковой контактной сварке стержней продольные (по оси) напряжения на поверхности сжимающие, а в глубине металла все три компонента растягивающие.

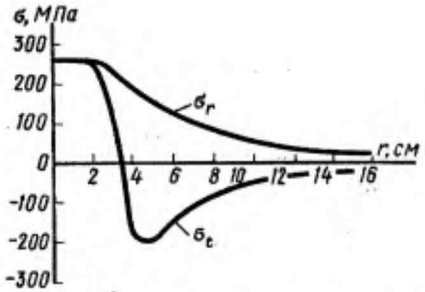


Рис. 6.16. Остаточные напряжения σ_r и σ_t в точечных сварных соединениях

Таким образом, рассмотрение остаточных напряжений в основных видах сварных соединений показывает, что максимальные растягивающие напряжения, как правило, близки к пределу текучести. В некоторых случаях они превышают $\sigma_т$ (корни многослойных швов, участки в глубине электрошлаковых соединений). Пластические деформации металла при сварке в отсутствие концентраторов напряжений составляют 1. . .2%. При наличии концентраторов — непроваров, несплавлений, шлаковых включений — пластические деформации могут быть настолько значительны, что существенно исчерпывается деформационная способность металла, в некоторых случаях даже наступает его разрушение. При сложении остаточных напряжений с рабочими часто возникают небольшие пластические деформации, которые в подавляющем большинстве случаев не влияют на прочность.

§ 6.3. ДЕФОРМАЦИИ И ПЕРЕМЕЩЕНИЯ В ЗОНЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Сварка вызывает искажение размеров и формы элементов сварных конструкций, их укорочение, изгиб, потерю устойчивости, закручивание. Эти искажения выражаются в перемещениях, которые зависят от формы сварной конструкции, расположения швов в ней, толщины металла. Многообразные виды перемещений сварных конструкций порождаются относительно небольшим числом видов деформаций и перемещений, возникающих в зоне сварных соединений. Деформации и перемещения в зоне сварных соединений зависят от количества теплоты, вводимого при сварке, распределения температур, свойств свариваемого металла.

Один из наиболее простых расчетных приемов определения перемещений сварных конструкций состоит в выделении двух самостоятельных этапов расчета. На первом находят деформации и перемещения в зоне сварных соединений — эту часть называют термомеханической частью задачи, а на втором методами сопротивления материалов или теории упругости определяют перемещения в конструкции, используя результаты, полученные на первом этапе. Эту часть называют деформационной частью задачи. Удобство такого приема состоит в том, что одни и те же результаты термомеханической части задачи, полученные один раз расчетным или экспериментальным путем, могут затем многократно использоваться при решении деформационных задач для самых разнообразных видов конструкций.

Различают пять основных видов деформаций и перемещений в зоне сварных соединений.

1. Продольные остаточные пластические деформации $\varepsilon_{x\,\text{пл ост}}$, создающие так называемую усадочную силу $P_{\text{ус}}$. При определении продольных напряжений σ_x по методу Г. А. Николаева (см. рис. 6.10, *в*) была получена эпюра остаточных пластических деформаций $\varepsilon_{\text{пл ост}}$. Чтобы установить зависимость между усадочной силой $P_{\text{ус}}$ и $\varepsilon_{\text{пл ост}}$, рассмотрим более подробно состояние сваренной пластины.

Разрежем пластину шириной $2B$ на продольные полоски, чтобы освободить каждую из них от имеющихся напряжений σ_x (рис. 6.17, *а*). Концы полос расположатся так, как показано на этом рисунке. Полоски, находящиеся за пределами зоны $2b_{\text{п}}$ пластических деформаций, будут иметь начальную длину L_0. Полоски внутри этой зоны будут короче, потому что они имеют остаточную пластическую деформацию $\varepsilon_{\text{пл ост}}$, которую берут со знаком минус. Укорочение $\Delta L=\varepsilon_{\text{пл ост}} L_0$. Концы полос будут геометрически повторять характер эпюры $\varepsilon_{\text{пл ост}}$ (рис. 6.17, *б*). Приложим к укороченным полосам растягивающие силы p, образующие в полосках напряжения σ, чтобы длина всех полос стала одинаковой и равной L_0 (рис. 6.17, *в*):

$$p=-\varepsilon_{\text{пл. ост}}E. \qquad (6.20)$$

«Склеим» между собой полоски. При этом они образуют целую пластину с напряжениями $\sigma_x=p$ по концам в пределах зоны пластических деформаций. Остальная часть ширины будет свободна от напряжений. В действительности к торцам сваренной пластины никаких сил не приложено, поэтому уравновесим силы p равными им по значению и противоположными по направлению (рис. 6.17, *г*). Интеграл от распределенной нагрузки p, взятый в пределах зоны пластических деформаций $2b_{\text{п}}$, даст некоторую силу, которая называется фиктивной усадочной силой $P_{\text{ус}}$. Так как $\varepsilon_{\text{пл ост}}<0$, то $P_{\text{ус}}<0$, или

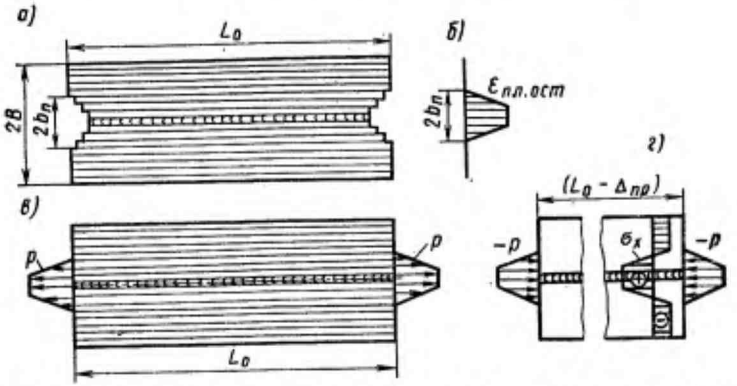


Рис. 6.17. Сварная пластина с остаточными пластическими деформациями $\varepsilon_{\text{пл. ост}}$

$$P_{\text{ус}}=\int_{-b_{\text{п}}}^{b_{\text{п}}}\varepsilon_{\text{пл. ост}}Es\,\mathrm{d}\,y, \qquad (6.21)$$

где s — толщина пластины.

Усадочная сила $P_{\text{ус}}$ вызовет по всей ширине равномерное сжатие $\sigma_{\text{сж}}=P_{\text{ус}}/(2Bs)$ и сформирует совместно с напряжениями $\sigma=p$, которые образовались в пределах зоны

$2b_п$ при растяжении полосок, эпюру остаточных собственных напряжений σ_x, которые были в пластине до ее разрезки на полосы. Укорочение пластины от силы $P_{ус}$ выражается величиной

$$\Delta_{пр} = P_{ус} L_0/(2BsE). \quad (6.22)$$

Таким образом, если пренебречь влиянием характера распределенных сил p по торцам пластины и заменить их силой $P_{ус}$, то будем иметь пластину, нагруженную по концам швов. Собственные напряжения в разных точках по

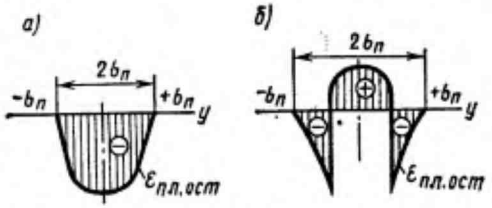


Рис. 6.18. Распределение $\varepsilon_{пл.ост}$ в низкоуглеродистой стали (*а*) и в стали при сварке, испытавшей структурные превращения (*б*)

ширине могут быть определены по общему правилу вычисления напряжений в пластине, имеющей остаточные пластические деформации укорочения $\varepsilon_{пл\,ост}$:

$$\sigma_x = -\varepsilon_{пл.\,ост} E + P_{ус}/(2Bs). \quad (6.23)$$

Значения $\varepsilon_{пл\,ост}$ и $P_{ус}$ в формуле (6.23) отрицательны. Напряжения σ_x показаны в сечении пластины на рис. 6.17, *г*. Как видим, определение усадочной силы $P_{ус}$ сводится к определению эпюры остаточных пластических деформаций $\varepsilon_{пл\,ост}$, которая может быть найдена различными расчетными методами или экспериментально. Для исключения погрешностей, вызываемых различными допущениями в расчетных методах, усадочную силу часто определяют экспериментально. Для этого достаточно измерить длины полосок до сварки и после разрезки пластины, как это было изложено в § 6.1 при определении остаточных напряжений. По разности показаний нужно найти изменение длины полосок Δ, а затем определить $\varepsilon_{пл\,ост} = \Delta/Б$, где $Б$ — длина базы измерения. По формуле (6.21) вычисляют $P_{ус}$. Можно также определить изменение длины пластины в результате сварки $\Delta_{пр}$ на какой-либо начальной базе L_0, а затем, воспользовавшись формулой (6.22), вычисляют $P_{ус}$.

При сварке легированных сталей, испытывающих структурные превращения, в зоне пластических деформаций могут возникнуть и пластические деформации удлинения (рис. 6.18, *а*, *б*). У отдельных сталей сила $P_{ус}$ может оказаться растягивающей, т. е. в этом случае пластина после сварки удлиняется, а не укорачивается. Однако у подавляющего большинства металлов сила $P_{ус}$ сжимающая.

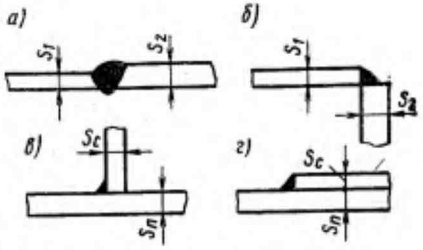


Рис. 6.19. Сварные соединения, выполненные однопроходной сваркой

Для разных сталей и сплавов получены эмпирические формулы для вычисления $P_{ус}$ в зависимости от условий сварки. Для низкоуглеродистых и низколегированных сталей с пределом текучести $\sigma_т \leqslant 300$ МПа при дуговой сварке стыковых, тавровых и нахлесточных соединений весьма жестких (с большой площадью поперечного сечения) элементов за один проход значение $P_{ус\,ж}$, выраженное в ньютонах, может быть определено по формуле

$$P_{ус.\,ж} = -[230\,000/(q_0 + 12\,600) + 3{,}58]\, q/v_c, \quad (6.24)$$

где q — эффективная мощность, Дж/с; v_c — скорость сварки, см/с; $q_0 = q/(v_c s_{расч})$ — удельная погонная энергия сварки, Дж/см²; $s_{расч}$ — расчетная толщина свариваемого элемента, см; $s_{расч} = 0{,}5\,(s_1 + s_2)$ в стыковых или угловом соединении пластин толщиной s_1 и s_2 (рис. 6.19, *а*, *б*) или $s_{расч} = 0{,}5\,(2s_п + s_c)$ в тавровом или нахлесточном соединении (рис. 6.19, *в*, *г*). Формула (6.24) действительна в диапазоне $q_0 = 4000 \ldots 38\,000$ Дж/см².

В случае многопроходной сварки зоны пластических деформаций от последующих слоев могут перекрывать зону пластических деформаций, образованную ранее уложенными слоями. При сварке таврового соединения последовательно двумя одинаковыми угловыми швами, зоны пластических деформаций которых перекрываются, суммарная усадочная сила от двух швов составляет 1,3. . .1,45 усадочной силы от первого шва. При укладке большего числа слоев данные приведены в справочнике [6].

Из-за нагрева кромки усадочная сила возникает и при резке металла. Погонная энергия при газовой резке стали,

приходящаяся на одну кромку для толщин s=0,6. . .4,0 см,

$$q/v_p = 42\,600\,(13{,}5 - s)\,s, \qquad (6.25)$$

где s выражено в см; q/v_p — в Дж/м.

2. Равномерные по толщине поперечные остаточные пластические деформации $\varepsilon_{y_{пл\,ост}}$, интеграл которых дает поперечную усадку $\Delta_{поп}$. При нагреве или проплавлении целой пластины движущимся источником теплоты в ней помимо продольных собственных деформаций возникают и поперечные собственные деформации ε_y, которые обычно создают поперечные пластические деформации $\varepsilon_{y_{пл\,ост}}$. Металл от нагрева расширяется, так как в нем возникают напряжения сжатия. Наиболее низкие значения $\sigma_т$ наблюдаются в области высокого нагрева, где и образуются пластические деформации. На рис. 6.20, *б* показан примерный характер распределения $\varepsilon_{y_{пл\,ост}}$ по ширине пластины. Если точку O по оси шва (рис. 6.20, *а*) принять как неподвижную, то можно определить перемещения v точек A, B, D в направлении к оси шва как интеграл $\int_0^y \varepsilon_{y_{пл.\,ост}}\,dy$ (рис. 6.20, *в*), где верхний предел интегрирования принимает значения y_A, y_B, y_D. Точки B и D одинаково смещаются к оси шва, так как зона поперечных пластических деформаций ограничена размерами $-b_{y_п}$ и $b_{y_п}$, а точки B и D находятся за ее пределами. Ширина пластины сокращается на размер

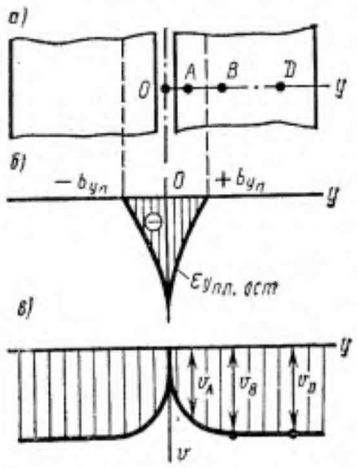


Рис. 6.20. Распределение $\varepsilon_{y\ пл.\,ост}$ и v в пластине

$$\Delta_{поп} = \int_{-b_{y_п}}^{+b_{y_п}} \varepsilon_{y_{пл.\,ост}}\,dy. \qquad (6.26)$$

В стыковом соединении пластин с зазором (рис. 6.21, *а*) расширение металла в поперечном направлении происходит намного свободнее, чем при сварке целой пластины. Нагреваемые кромки достаточно свободно перемещаются в зазор, в результате чего возникают перемещения v, показанные на рис. 6.21, *б*. Максимально возможное перемещение каждой кромки при отсутствии теплоотдачи в воздух

$$v_{max} = \frac{\alpha}{c\gamma}\,\frac{q}{v_c s}, \qquad (6.27)$$

где q — мощность, вводимая в обе кромки (в каждую кромку вводится $q/2$); v_c — скорость сварки; s — толщина листа; α — коэффициент линейного расширения; $c\gamma$ — объемная теплоемкость (см. табл. 6.1).

После максимального сближения в точке O кромки на стадии охлаждения отходят в обратном направлении, пока металл находится в жидком состоянии или имеет низкий предел текучести. В некоторой точке F металл приобретает достаточную прочность и величина $2v_F$ предстает как поперечная усадка $\Delta_{поп}=2v_F<2v_{max}$. В зависимости от условий и способа сварки $\Delta_{поп}$ имеет разные значения:

$$\Delta_{поп} = A\,\frac{\alpha}{c\gamma}\,\frac{q}{v_c s}, \qquad (6.28)$$

где A — эмпирический коэффициент. При электрошлаковой сварке A=1,6; при электродуговой сварке с полным проплавлением $A\approx$1,0. . .1,2.

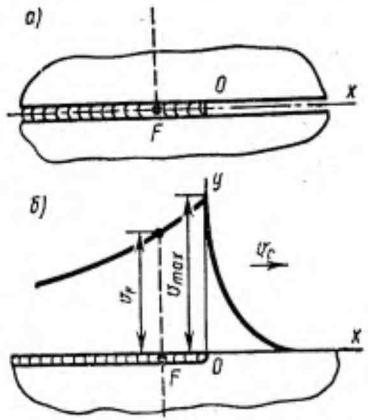


Рис. 6.21. Перемещение кромок пластины в стыковом соединении с зазором

Абсолютное значение $\Delta_{поп}$ изменяется в широких пределах в зависимости от вводимой при сварке энергии. При дуговой однопроходной сварке стыкового соединения металлов толщиной до 3. . .5 мм $\Delta_{поп}$ составляет обычно десятые доли миллиметра; до 5. . .20 мм $\Delta_{поп}$=0,5. . .1,5 мм; при электрошлаковой сварке $\Delta_{поп}$=3. . .8 мм и более. Поперечная усадка в случае неполного проплавления листа, например в нахлесточных и тавровых соединениях, также имеет большое практическое значение. Коэффициенты A, входящие в формулу (6.28), для случая неполного проплавления приведены в справочнике [6].

При определении $\Delta_{поп}$ по формуле (6.28) q — это эффективная мощность, вводимая в пластину, для которой находят поперечную усадку. Для нахлесточных и тавровых соединений определение эффективной мощности $q_п$, вводимой в лист толщиной $s_п$, к которому приваривают другой лист толщиной $s_р$, приближенно можно проводить по формуле

$$q_п = 2qs_п/(2s_п + s_р), \qquad (6.29)$$

где q — полная эффективная мощность источника нагрева. Поперечная усадка может быть определена экспериментально путем измерения баз, расположенных поперек шва с

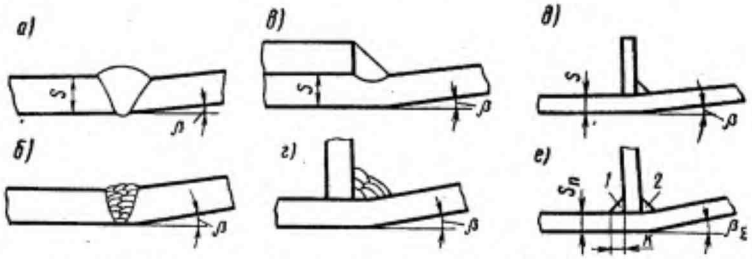


Рис. 6.22. Угловое перемещение при сварке стыковых (*а*, *б*), нахлесточных (*в*) и тавровых (*г*. . .*е*) соединений

одной и другой стороны пластины. Размер измеряемых баз должен быть больше ширины зоны, которая нагревалась до 150 °С (для сталей). Величина $\Delta_{поп}$ находится как полусумма значений, полученных на лицевой и обратной сторонах.

3. Неравномерные по толщине поперечные пластические деформации, образующие угловое перемещение β в зоне сварного соединения. Неравномерные по толщине или неравномерные по сечению многослойного шва поперечные пластические деформации $\varepsilon_{y_{пл\,ост}}$ вызывают поворот одной части пластины относительно другой на угол β (рис. 6.22, *а*. . .*е*). При проплавлении целой пластины или выполнении углового шва угол β зависит от отношения H/s глубины провара к толщине пластины, формы провара и его ширины. Характер зависимости β (H/s) показан на рис. 6.23. При малой глубине провара непроваренная часть сопротивляется усадке проваренной части. При большой глубине провара эпюра $\varepsilon_{y_{пл\,ост}}$ достаточно равномерна по толщине. В обоих случаях угол

β мал. Однако и при полном проваре часто возникает угол поворота β (пунктирная линия на рис. 6.23). При сварке двух однопроходных швов (см. рис. 6.22, *е*) угол β_Σ определяется суммой углов β_1 от неравномерной усадки листа при сварке шва *1*, β_2 от неравномерной усадки шва *2* и $\beta_ш$ от усадки собственно шва *2* в направлении его гипотенузы. Угол $\beta_ш$ мал по сравнению с примерно одинаковыми β_1 и β_2. Поэтому угол $\beta_\Sigma \approx 2\beta_1$. Если $k \leqslant 0{,}5 \times s_п$ (рис. 6.22, *е*), то угол β_Σ в радианах для сталей можно приближенно вычислить по формуле

$$\beta_\Sigma = 0{,}1\,(k/s_п - 0{,}1). \qquad (6.30)$$

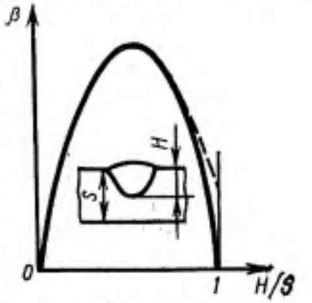


Рис. 6.23. Характер зависимости β от H/s

Шов с одним и тем же катетом k можно выполнить с большим или меньшим проплавлением листа. Поэтому зависимость (6.30) справедлива при эффективной погонной энергии, вводимой в лист: $q_п/v_с = 16\,000\,k^2$ для $k/s_п \leqslant 0{,}5$, $q_п/v_с = 10\,500\,k^2$ для $k/s_п \leqslant 0{,}7$; при $q_п/v_с = 7500\,k^2$ для $k/s_п \leqslant 1$ (k выражено в см; $q_п/v_с$ — в Дж/см), $q_п$ можно опреде-

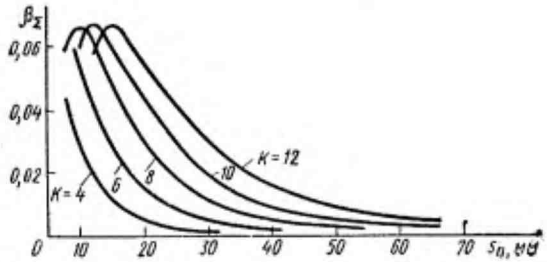


Рис. 6.24. Зависимость β_Σ от $s_п$ и K при сварке сталей

лить по формуле (6.29). Для случая $q_п/v_с = 10\,500\,k^2$ на рис. 6.24 показана зависимость угла β_Σ от толщины листа $s_п$ и катета шва k. Уменьшение β_Σ при малых $s_п$ вызвано ростом относительного проплавления $H/s_п$ (см. рис. 6.23). Аналогичный вид имеют кривые β_Σ и для алюминиевых сплавов АМг5В, АМг6, АМг61 (рис. 6.24) при сварке двух угловых однопроходных швов. На рис. 6.25 показано перемещение Δ края полки при $L = 180$ мм ($\Delta = \beta_\Sigma L$).

Аналитических зависимостей углов β для широкого изменения условий сварки нет. Значения β несложно получить экспериментально, используя профилограммы в перпендикулярном шву направлении.

4. Перемещения в зоне шва в направлении перпендикуляра к поверхности свариваемых листов w,

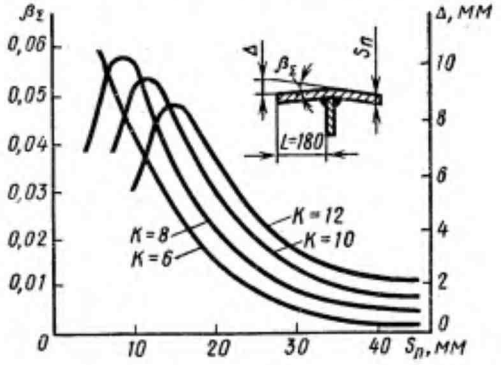


Рис. 6.25. Зависимость β_Σ и Δ от $S_п$ и K при сварке алюминиевых сплавов

которые образуют смещение Δ_z. Перемещения w возникают чаще всего при сварке металла небольшой толщины. Нагрев металла, сопровождающий сварку, вызывает его расширение и образование временных напряжений сжатия. В тонком (до 1 мм) металле может возникнуть потеря устойчивости — одна кромка смещается относительно другой, и это положение фиксируется швом. Возникает смещение Δ_z. Неравномерный нагрев по толщине вызывает изгиб листа в процессе сварки. Если один лист по этой причине перемещается, а другой — нет, то также возникает смещение Δ_z. Наиболее закономерный характер имеют перемещения w при сварке кольцевых швов оболочек. Вследствие расширения при нагреве значительная зона вблизи кромки оболочки удлиняется в направлении окружности, возникают радиальные перемещения свариваемых кромок. Радиальные перемещения кромок w будут разные, если оболочки имеют разную жесткость, как, например, показано на рис. 6.26, *а*, когда одна из оболочек представляет собой часть шпангоута, а другая не имеет дополнительных жесткостей. Эти перемещения по длине развертки части периметра показаны кривыми *1* и *2*. Они регистрировались на расстоянии 6 мм от свариваемых кромок. Шов зафиксировал относительное

перемещение кромок, и на рис. 6.26, *б* показано их положение после полного остывания. Возникло смещение Δ_z, которое снижает прочность и устойчивость оболочек. Перемещения w могут быть вычислены, но обычно их определяют экспериментально.

5. Сдвиговые деформации γ_{xy}, которые образуют в сварном соединении смещения Δ_x. При сварке в зоне нагрева точки свариваемых пластин перемещаются в

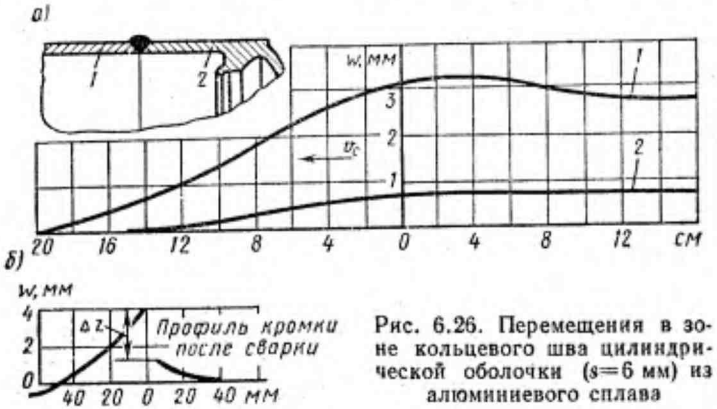


Рис. 6.26. Перемещения в зоне кольцевого шва цилиндрической оболочки (s=6 мм) из алюминиевого сплава

направлении оси x. Впереди источника нагрева они движутся в одном направлении с ним, а позади него — в противоположном. Максимальные перемещения u различны — наибольшие у кромок, которые убывают с увеличением координаты y. Возникают сдвиговые упругие и пластические деформации. При прочих равных условиях $u \sim \frac{\alpha}{c\gamma}\frac{q}{v_c s}$, т. е. зависит от удельной погонной энергии, вводимой в каждую из свариваемых пластин. В практическом отношении интерес представляет то обстоятельство, что при одинаковых температурных полях максимальное перемещение $u_к$ края пластины, наблюдаемое примерно в точке положения источника, в 1,5 раза больше, чем максимальное перемещение $u_с$ середины пластины (рис. 6.27, *а*, *б*). Такое явление обычно наблюдается при сварке нахлесточных или тавровых соединений. Разница в перемещениях $u_к$ и $u_с$ может оказаться еще больше, если больше вводится теплоты в привариваемый лист, чем в полку. Разница в перемещениях $\Delta x=(u_к-u_с)$ зафиксируется швом и сохранится как остаточная. Привариваемое ребро или нахлестка переместятся после полного остывания в направлении сварки. Значение

Δx при нормальном ведении сварки металла толщиной 5. . . 10 мм составляет несколько десятых долей миллиметра, но может быть и более миллиметра при сильном разогреве привариваемого элемента. При контактной точечной или шовной сварке нахлесточных соединений также могут возникать смещения Δ_x в результате сдвига электродов

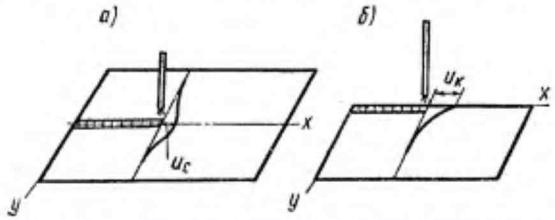


Рис. 6.27. Перемещения u впереди источника теплоты при его движении по середине пластины ($а$) или краю ($б$)

относительно друг друга или сильного сопротивления вращению одного из роликов.

Рассмотренные выше деформации и перемещения в зоне сварных соединений, особенно $P_{ус}$ и $\Delta_{поп}$, будут в дальнейшем неоднократно использованы для описания и вычисления разнообразных искажений формы сварных конструкций при решении деформационных задач.

§ 6.4. РАЗЛИЧНЫЕ ВИДЫ ДЕФОРМАЦИЙ ЭЛЕМЕНТОВ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Сварка стыкового соединения может производиться без прихваток как с зазором между пластинами, так и без него. Типичным примером сварки с зазором является электрошлаковая сварка. В общем случае в процессе сварки пластин с зазором возникает одновременно несколько видов перемещений.

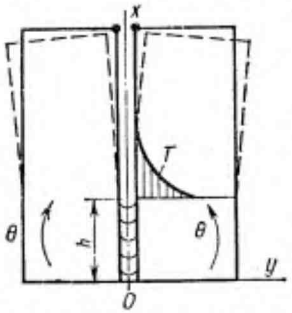


Рис. 6.28. Перемещения при сварке пластин

1. Изгиб полос от неравномерного нагрева их по ширине. Распределение температур T по ширине пластины показано на рис. 6.28. Изгиб приводит к раскрыванию сварочного зазора.

2. Перемещения, вызываемые остыванием пластин в заваренной части шва. Сокращение зоны термического влияния в поперечном направлении Oy (рис. 6.28) приводит к поступательному сближению пластин $\Delta_{пос}$, а главное — к их повороту θ, который вызывает закрывание зазора.

3. Перемещения, вызываемые изменением объема металла при его структурных превращениях в процессе

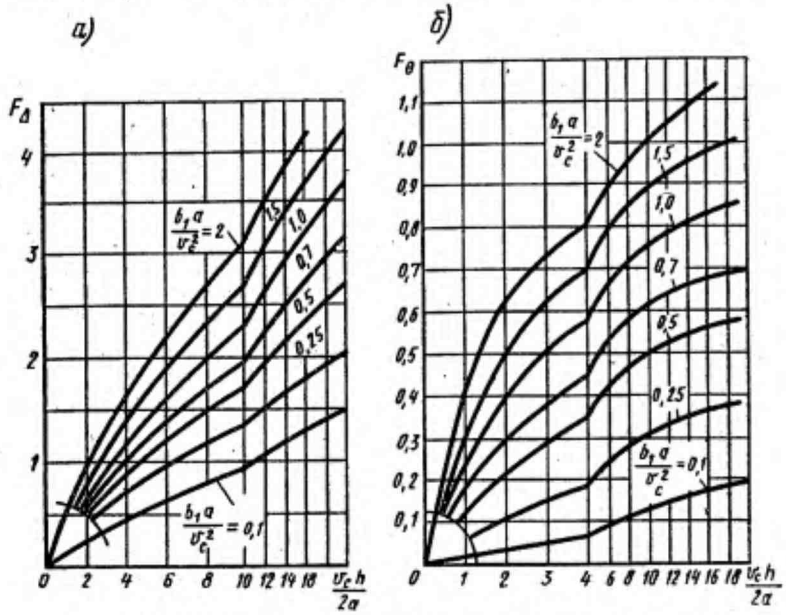


Рис. 6.29. Номограммы для определения функций F_Δ и F_θ

сварки. Они могут как открывать, так и закрывать зазор при сварке.

Сочетание трех перечисленных выше видов перемещений может создавать самые разнообразные изменения зазора в процессе сварки.

Перемещения, описываемые в п. 2, определяют по формулам

$$\Delta_{пос} = \alpha' q F_\Delta / (\pi c \gamma s v_c); \qquad (6.31)$$

$$\theta = \alpha' q F_\theta / (2\pi \lambda s), \qquad (6.32)$$

где α' — коэффициент линейного расширения без структурных превращений (их влияние будет учтено отдельно); для низкоуглеродистых и низколегированных сталей $\alpha' \approx \approx (16{,}5. . .17) \times 10^{-6}\ °C^{-1}$; F_Δ и F_θ — безразмерные функции, приведенные на рис. 6.29, $а$, $б$ и зависящие от без-

размерной длины сваренного шва $v_c h/2a$ и безразмерной теплоотдачи пластин при сварке;

$$\frac{b_1 a}{v_c^2} = 22\left[\frac{27{,}2\cdot 10^{-7} a\varepsilon}{c\gamma s v_c^2}\left(0{,}118\frac{q}{\lambda s}\right)^{1{,}61}\right]^{2{,}66}, \qquad (6.33)$$

где ε — степень черноты поверхности свариваемых пластин; для проката черных металлов $\varepsilon=0{,}9$; λ, a, $c\gamma$ приведены в табл. 6.1.

Предотвратить поступательное сближение при электрошлаковой сварке закреплением пластин или их скреплением между собой практически невозможно из-за громадных сил усадки, возникающих в свариваемых пластинах. Если на некоторой длине h_1 шва угловые перемещения устранены, то для определения углового перемещения, возникшего на участке шва от h_1 до h_2, необходимо из θ_2 при h_2 вычесть θ_1 при h_1.

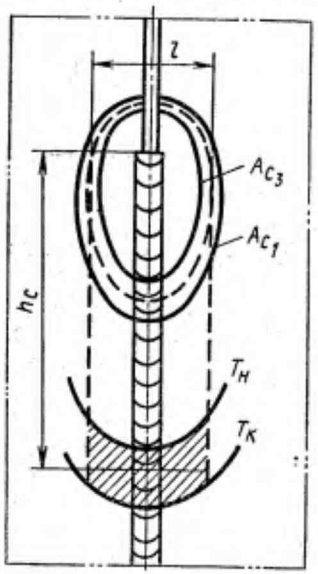


Рис. 6.30. Зоны структурных превращений при сварке

Структурные превращения типа $\alpha \rightarrow \gamma$ сопровождаются уменьшением объема металла, а обратные $\gamma \rightarrow \alpha$ — увеличением объема. В процессе сварки, на стадии нагрева металла, между изотермами A_{c_1} и A_{c_3} (рис. 6.30) в зоне шириной l происходят структурные превращения $\alpha \rightarrow \gamma$. Через некоторое время в той же зоне в интервале температур от $T_н$ до $T_к$ идет процесс $\gamma \rightarrow \alpha$. В заштрихованной зоне объем металла увеличивается. Пока заштрихованная зона находится в начальной части шва — до середины заваренной части, ее расширение приводит к закрыванию сварочного зазора. Когда же заштрихованная зона становится ближе к месту сварки, чем к началу шва, поворот пластин от ее расширения будет открывать сварочный зазор.

В сталях с высокой степенью легирования, у которых $T_н$ и $T_к$ низкие, а h_c велика, процесс закрывания зазора обычно продолжается, пока длина шва h не превысит 1,5 м.

В низкоуглеродистых и низколегированных сталях, таких, как стали 20 или 20ГС, открывание зазора начинается при длине шва 0,6. . .0,7 м.

Изменения зазора при электрошлаковой сварке могут привести к нарушению режима сварки, так как при этом меняется скорость сварки и соотношение между основным и присадочным материалом при формировании шва. В некоторых случаях чрезмерное открывание зазора приводит к вытеканию ванны из-под формирующих ползунов, а закрывание — к короткому замыканию мундштуков на изделие.

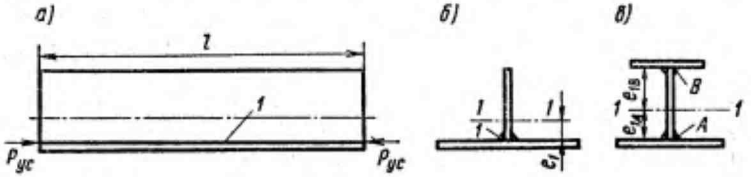


Рис. 6.31. Сварная балка с продольными швами

Перемещения конструкций балочного типа. К конструкциям балочного типа относятся собственно балки, колонны и рамные конструкции, состоящие из отдельных балок.

Характерными особенностями сварных конструкций балочного типа являются их относительно большая длина по сравнению с высотой и шириной, поясные швы вдоль всей длины, наличие поперечных швов, прикрепляющих ребра, диафрагмы и вспомогательные элементы. Если в балках имеются несимметрично расположенные продольные и поперечные швы, то из-за большой длины балок в них возникают значительные прогибы.

После сварки продольного шва *1* (рис. 6.31, *а*, *б*) возникает усадочная сила $P_{ус}$, которая создает укорочение балки, вычисляемое по формуле

$$\Delta_{пр} = P_{ус} l/(EF), \qquad (6.34)$$

и момент

$$M = P_{ус} e_1 \qquad (6.35)$$

от силы $P_{ус}$ на плече e_1 относительно центра тяжести сечения, который вызывает изгиб балки f, вычисляемый по формуле

$$f = P_{ус} e_1 l^2/(8EJ_1) = Ml^2/(8EJ_1). \qquad (6.36)$$

Угловой поворот торцов относительно друг друга определяют по формуле

$$\theta = Ml/(8EJ_1). \qquad (6.37)$$

В качестве площади F в формуле (6.34) берут суммарную площадь пояса и стенки, а в качестве J_1 в (6.36) и (6.37) — момент инерции площади тавра относительно оси $1-1$, проходящей через центр тяжести.

Усадочную силу необходимо определять с учетом жесткости балки по формуле

$$P_{\text{ус}} = P_{\text{ус.ж}}/[1 - P_{\text{ус.ж}}(e_1^2/J_1 + e_2^2/J_2 + 1/F)/\sigma_{\text{т}}], \quad (6.38)$$

где $\sigma_{\text{т}}$ — предел текучести металла балки; J_1, J_2, F — главные центральные моменты инерции и площадь поперечного сечения балки; e_1 и e_2 — эксцентриситеты приложения усадочной силы относительно главных центральных осей поперечного сечения. Значения $P_{\text{ус.ж}}$ необходимо находить по формуле (6.24).

При использовании формулы (6.38) необходимо иметь в виду, что выражение в квадратных скобках не может быть менее 0,5. Точка приложения усадочной силы должна совпадать с центром тяжести эпюры остаточных пластических деформаций. Для соединения встав̆р эта точка находится примерно на стыке стенки и полки.

Если к сваренному тавру присоединяют еще один пояс швом (рис. 6.31, *в*), то от него отдельно находят укорочение и изгиб. Площадью F является вся площадь поперечного сечения двутавра, а момент инерции J находят относительно оси $1-1$ также для всей площади. Эксцентриситетом для усадочной силы шва B является плечо e_{1B}. Прогибы от швов A и B в рассмотренном примере имеют разные знаки. При нахождении суммарного прогиба их следует вычитать. Если поперечное сечение симметрично относительно оси $1-1$, то остаточный прогиб при изгибе от сварки двух швов у балки будет направлен кверху, т. е. шов A вызывает больший прогиб, чем шов B.

Если балка состоит из нескольких продольных элементов, которые вначале собирают на прихватках, а затем сваривают, то при вычислении укорочений и прогибов прихваточные швы считают достаточно прочными и жесткими, чтобы обеспечить совместную работу всех элементов. Например, если балка (рис. 6.31, *в*) сначала собрана на прихватках, то в расчет перемещений от швов A и B вводят всю площадь поперечного сечения и берут момент инерции относительно оси $1-1$, а также эксцентриситет e_{1A} для шва A и эксцентриситет e_{1B} для шва B.

Отрезка полос от листа также сопровождается их изгибом. Во время отрезки неравномерный нагрев вызывает их сложное искривление, но после остывания их прогиб

можно определить по тем же правилам, что были рассмотрены выше для балок.

Поперечные швы, расположенные перпендикулярно продольной оси балки, вызывают укорочение балки, а если они расположены не в центре тяжести ее поперечного сечения, то и ее изгиб. Пусть на пояс двутавровой балки (рис. 6.32, *а*, *б*) уложен поперечный валик, который вызвал поперечную усадку в поясе $\Delta_{\text{поп}} < 0$. Удалим из балки

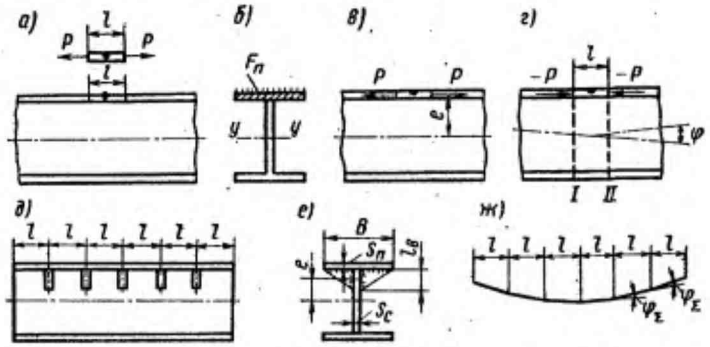


Рис. 6.32. Двутавровая балка с поперечными швами

кусок полки длиной l (верхняя часть рис. 6.32, *а*) и приложим к нему силы P, вызывающие удлинение этого куска на размер $-\Delta_{\text{поп}}$:

$$P = -\Delta_{\text{поп}} E F_{\text{п}}/l, \quad (6.39)$$

где $F_{\text{п}}$ — площадь поперечного сечения верхней полки.

После удаления куска l в балке никаких напряжений, вызванных швом, не будет. Не будет также укорочения и изгиба. Возвратим кусок с силами P в балку (рис. 6.32, *в*) и «приклеим» его к полке. Снимем фиктивные силы P, приложив противоположные им силы $-P$ (рис. 6.32, *г*). Силы $-P$ на длине балки l вызовут ее укорочение:

$$\Delta_{\text{пр}} = -Pl/(EF). \quad (6.40)$$

Подставим в (6.40) величину P из (6.39):

$$\Delta_{\text{пр}} = \Delta_{\text{поп}} F_{\text{п}}/F. \quad (6.41)$$

Силы $-P$ создадут изгибающий момент $M = -Pe$ и вызовут поворот сечения I относительно сечения II на угол φ:

$$\varphi = Ml/(EJ), \quad (6.42)$$

где J — момент инерции всего поперечного сечения относительно оси $y-y$.

Выразим M в формуле (6.42) через P из (6.39). Получим

$$\varphi = \Delta_{\text{поп}} F_{\text{п}} e / J. \qquad (6.43)$$

Величина $F_{\text{п}}e = S_{\text{п}}$ представляет собой статический момент поперечного сечения пояса, где произошла усадка $\Delta_{\text{поп}}$ относительно центра тяжести сечения балки. Поэтому

$$\varphi = \Delta_{\text{поп}} S_{\text{п}} / J. \qquad (6.44)$$

Таким образом, формулы (6.41) и (6.44) не содержат длины участка l. Можно считать, что поперечный шов вызывает местное укорочение длины балки и излом ее оси на угол φ в области поперечного сечения балки (см. рис. 6.32, *г*), где расположен шов. Рассуждения и формулы не изменятся, если считать, что поперечный шов уложен на вертикальной стенке. В этом случае в формулах (6.41) и (6.44) вместо $F_{\text{п}}$ и $S_{\text{п}}$ появятся площадь и статический момент площади того участка, где уложен шов.

Большие прогибы балок возникают, если имеется много поперечных швов и они расположены несимметрично по ширине элемента. На рис. 6.32, *д*, *е* балка имеет ребра, приваренные к полке и стенке, толщины которых $s_{\text{п}}$ и $s_{\text{с}}$ могут быть разными. Определение угла φ_{Σ} от двух приваренных ребер производится в этом случае суммированием углов, возникших от усадки полки $\varphi_{\text{п}}$ и усадки стенки $\varphi_{\text{с}}$. Угол $\varphi_{\text{п}}$ определяется от усадки $\Delta_{\text{поп п}}$ полки на участке $(B - s_{\text{с}})$. Угол $\varphi_{\text{с}}$ определяется от усадки стенки от швов с двух сторон, т. е. $2\Delta_{\text{поп с}}$ на участке $l_{\text{п}}$, плечо которого при определении статического момента S от площади $l_{\text{п}}s_{\text{с}}$ берется равным эксцентриситету e. Зная углы $\varphi_{\Sigma} = \varphi_{\text{п}} + \varphi_{\text{с}}$ в каждом из сечений, где расположено по два ребра, и расстояния между ребрами l, можно с помощью построения на рис. 6.32, *ж* определить прогиб балки f в средней точке. В рассматриваемом случае он равен

$$f = \varphi_{\Sigma}(3l/2 + 2l + l). \qquad (6.45)$$

В балках может возникать различного рода закручивание продольной оси. На рис. 6.33, *а* показана крутильная форма потери устойчивости. Усадочная сила в крестообразной балке создает в периферийной части сечения сжатие, в результате чего листовые элементы теряют устойчивость. Закручивание балок длиной L с закрытым профилем (рис. 6.33, *г*), например коробчатых (рис. 6.33, *б*), может возникать вследствие смещения Δ_x при приварке

стенок к поясу (рис. 6.33, *в*). Такое смещение равносильно по своему действию приложению фиктивных крутящих моментов M (рис. 6.33, *г*). Угол закручивания балки от смещения в одном шве

$$\varphi = \Delta_x L / \omega_{\text{к}}, \qquad (6.46)$$

где L — длина балки; $\omega_{\text{к}}$ — удвоенная площадь, охватываемая средней линией тонкостенного сечения.

Для примера, изображенного на рис. 6.33, *б*, сечение имеет удвоенную площадь $\omega_{\text{к}} = 2 \cdot 30 \cdot 40$ см^2 = 2400 см^2.

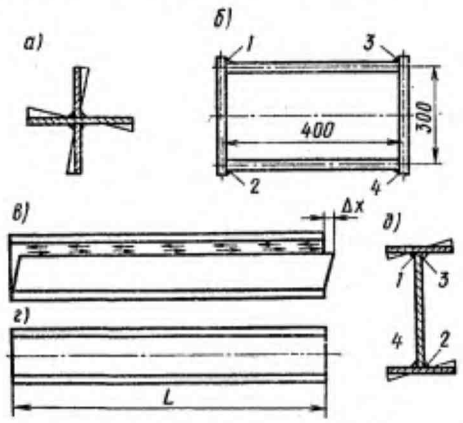


Рис. 6.33. Закручивание сварных балок

Если швы сварены в противоположных направлениях, то закручивание от отдельных швов суммируется. Если швы *1* и *4* и швы *2* и *3* (рис. 6.33, *д*) сварены в разных направлениях, то угол φ будет в четыре раза больше, чем при сварке одного шва. Закручивание балок тем больше, чем меньше $\omega_{\text{к}}$ и больше L. Закручивание возникает вследствие неодновременной поперечной усадки углового шва по его длине (рис. 6.33, *д*). Например, шов *1* по мере его сварки закручивает верхний пояс; шов *2* — нижний, так как швы *3* и *4* пока отсутствуют, а есть лишь прихватки. Швы *3* и *4* не могут вызвать такое же противоположное закручивание в противоположном направлении из-за жесткости швов *1* и *2*. Сварка в кондукторах или жесткие прихватки устраняют этот дефект. Значительное кручение может возникать у тонкостенных открытых профилей при укладке продольных швов, расположенных вне осей симметрии.

Для рамных конструкций специфическим искажением формы является так называемая пропеллерность, при которой противоположные углы выступают из плоскости рамы в разных направлениях.

При сварке двутавровых балок, особенно с широкими полками, существенное искажение формы вызывают угловые перемещения β при сварке поясных швов (см. рис. 6.32). В балках в результате сварки возможна потеря устойчивости стенок или полок. Это уменьшает их несущую способность при работе на изгиб или на сжатие. Потеря устойчивости рассмотрена в конце настоящего параграфа.

Перемещение в оболочках. В оболочках возникают временные и остаточные перемещения. От временных перемещений при сварке кольцевых швов частично зависят конструкции приспособлений и оснастка. Например, предотвратить радиальные перемещения в тонкостенных оболочках (см. рис. 6.26) можно прижатием кромок роликами, перекатывающимися впереди сварочной горелки, или использованием охватывающего жесткого кольца. Во втором случае сварку необходимо выполнять изнутри.

В толстостенных оболочках при электрошлаковой сварке радиальные перемещения незначительны, но возникают перемещения v поперек шва, которые сильно изменяют сварочный зазор в процессе сварки. Ввиду пространственного расположения стыка в отдельных местах периметров возникает значительное закрывание зазора, которое, будучи зафиксировано швом, после полного остывания превращается в остаточные перемещения. Наибольшая поперечная усадка возникает в зоне около 0,4 периметра, считая от места начала сварки. Это вызывает излом продольной оси свариваемого цилиндра. При больших длинах цилиндров или осей необходимо проводить предварительную сборку, создавая клиновидный зазор.

Рассмотрим остаточные перемещения. В кольцевых швах тонкостенных цилиндрических оболочек после сварки возникает окружная усадочная сила, которая действует на оболочку аналогично распределенной нагрузке p (рис. 6.34, *а*), повторяющей характер эпюры продольных остаточных пластических деформаций $\varepsilon_{\text{пл. ост}}$:

$$p = \varepsilon_{\text{пл. ост}} Es/r, \qquad (6.47)$$

где s — толщина стенки оболочки; r — радиус цилиндрической оболочки. В результате образуется местный изгиб и уменьшение диаметра в зоне кольцевого шва (рис. 6.34, *б*), которое распространяется примерно на длину

l, зависящую от r и s. Максимальный радиальный прогиб может составлять около 0,5. . .2,0 мм. Использование при сварке жесткого подкладного кольца уменьшает $\varepsilon_{\text{пл. ост}}$. Для приближенных расчетов перемещений в оболочке нагрузку p на рис. 6.34, *а* можно принимать равномерно распределенной по ширине зоны пластических деформаций $2b_{\text{п}}$:

$$p = P_{\text{ус}}/(2b_{\text{п}}r). \qquad (6.48)$$

При сварке алюминиевых оболочек радиальные перемещения во внешнюю сторону в процессе сварки оказываются настолько значительными, что возникает изгиб краев оболочек, который фиксируется швом. Последующее остывание хотя и создает дополнительные перемещения, аналогичные представленным на рис. 6.34, *б*, но не может полностью устранить ранее возникший изгиб. Остаточные перемещения в алюминиевых оболочках направлены обычно наружу.

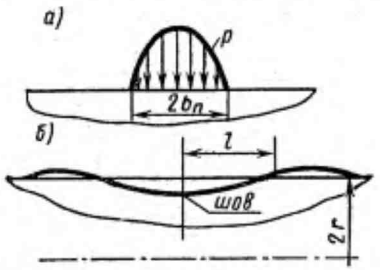


Рис. 6.34. Перемещения в зоне кольцевого шва тонкостенной цилиндрической оболочки от расчетной нагрузки p, вызванной остаточными пластическими деформациями

При выполнении продольных швов оболочек заметные временные перемещения возникают при электрошлаковой сварке, в особенности при сварке одновременно двух швов на заготовках полуцилиндрической формы. Перемещения возникают такие же, как при электрошлаковой сварке стыковых соединений. Остаточные перемещения от продольных швов в длинных цилиндрических оболочках диаметром D состоят из прогиба f (рис. 6.35, *б*), который вычисляется, как в балках, по формуле (6.36) при известных усадочной силе $P_{\text{ус}}$ и моменте инерции J кольцевого сечения оболочки, а также местных искажений формы окружности на торцах, характер которых будет понятен, если рассмотреть короткую оболочку на рис. 6.35, *а*. В короткой оболочке изгибу от усадочных сил $P_{\text{ус}}$ сопротивляется не весь периметр оболочки, а лишь часть его (рис. 6.35, *в*, дуга ABC). Центр тяжести этой дуги находится в точке O_1, а e — плечо усадочной силы. Ввиду малого момента инерции дуги ABC относительно оси $1-1$,

проходящей через точку O_1, возникает значительный изгиб образующей короткой оболочки, обозначенный f_1 (рис. 6.35, *а*). Форма оболочки искажается: размер D_1 в середине цилиндра становится меньше, D_2 на краю — больше, чем диаметр D до сварки. В длинных оболочках их концевые участки испытывают подобные перемещения. Кольцевые швы в сферических оболочках создают перемещения, аналогичные перемещениям от кольцевых швов в цилиндрических оболочках.

К оболочкам часто привариваются штуцера, патрубки, горловины, элементы крепления, швы которых имеют либо

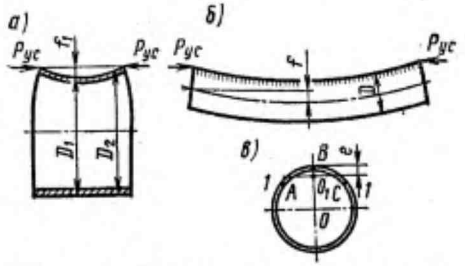


Рис. 6.35. Перемещения в цилиндрических оболочках от продольных швов

форму кольца в сферических, либо форму прямоугольника или кольца (в плане) в цилиндрических оболочках. Размеры этих швов обычно намного меньше, чем диаметры оболочек. Искажение в первую очередь выражается в приближении привариваемого элемента к центру оболочки. Если элемент приварен снаружи угловыми швами, то оболочка под этим местом становится плоской или сильно уменьшается ее кривизна. При работе сосуда под внутренним давлением в таких местах появляются дополнительные напряжения, вызванные уменьшением кривизны.

Потеря устойчивости листовых элементов от сварки. Под действием усадочных сил в элементах конструкций возникают напряжения сжатия, вызывающие потерю устойчивости, которой в основном подвержены листовые элементы толщиной до 10. . .15 мм. Особенно значительны перемещения у тонких листов (3. . .4 мм).

Встречаются два типа задач, связанных с потерей устойчивости, существенно отличающихся по сложности решения: 1) определение возможности потери устойчивости; 2) определение перемещений после потери устойчивости.

Задачи первого типа проще — для их решения требуется найти критические силы и напряжения. Устойчивость элементов может рассматриваться либо в отношении только собственных сварочных напряжений, либо, если необходимо определить устойчивость в период эксплуатации, в отношении рабочих и собственных напряжений. Решение таких задач включает в себя: а) определение

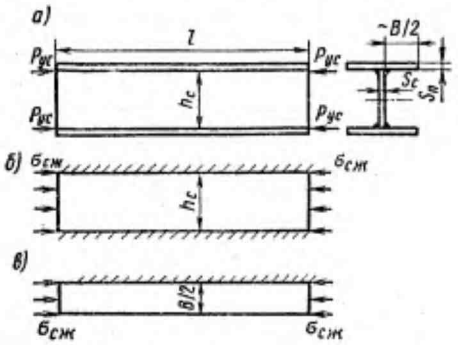


Рис. 6.36. Потеря устойчивости сварной двутавровой балки

формы, размеров и условий закрепления элемента, который может потерять устойчивость; б) определение действующих сил и напряжений; в) определение критических сил и напряжений и сравнение их с действующими.

Рассмотрим ход решения задачи на примере сварной двутавровой балки (рис. 6.36, *а*). Усадочные силы вызывают в продольном направлении сжатие стенки и поясов, которые могут потерять устойчивость. Стенка представляет собой прямоугольную пластину (рис. 6.36, *б*) шириной h_c и длиной l, длинные стороны которой считаем находящимися в жесткой заделке, так как они приварены к поясам. Усадочные силы $2P_{ус}$ на некотором расстоянии от концов создают равномерное сжатие $\sigma_{сж}=2P_{ус}/A$, где A — площадь поперечного сечения балки. Поэтому пластина нагружена по коротким сторонам напряжениями $\sigma_{сж}$. Критические напряжения для этого случая нагружения

$$\sigma_{кр}=7\pi^2E\,(s_c/h_c)^2/[12\,(1-\mu^2)]. \qquad (6.49)$$

Если $\sigma_{сж}>\sigma_{кр}$, произойдет потеря устойчивости. Полка также может потерять устойчивость. Половина полки шириной около $B/2$ представляет собой пластину, заделанную только по одной длинной стороне (рис. 6.36, *в*).

Пластина нагружена напряжениями $\sigma_{сж}$. Критическое напряжение для такой пластины

$$\sigma_{кр} = 1{,}33\pi^2 E\,(2s_п/B)^2/[12\,(1-\mu^2)]. \qquad (6.50)$$

При приварке листа к каркасу нахлесточным соединением (рис. 6.37, *а*) основные перемещения создаются усадочными силами — фактор поперечной усадки крайне мал. Поэтому лист рассматриваем как прямоугольную пластину, заделанную по всем четырем сторонам, с напряжениями сжатия вдоль пластины $2P_{ус}/(sB_2)$ и поперек пластины $2P_{ус}/(sB_1)$, где s — толщина листа.

В плоских элементах оболочек также встречаются примеры потери устойчивости. При вварке круглых эле-

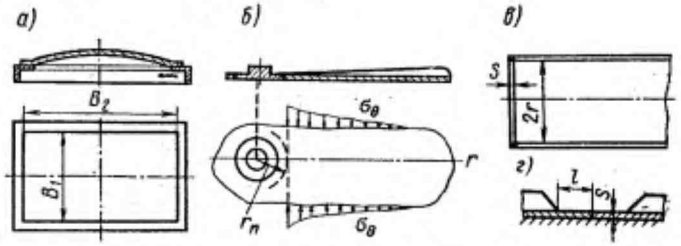


Рис. 6.37. Листовые элементы, теряющие устойчивость в сварных конструкциях

ментов в плоский лист (рис. 6.37, *б*) в нем возникают радиальные напряжения растяжения σ_r и окружные напряжения сжатия σ_θ. Последние чаще всего вызывают потерю устойчивости. Радиальные критические напряжения зависят от радиуса $r_п$, ограничивающего зону пластических деформаций, и толщины листа s:

$$\sigma_{r_{кр}} = 3E\,(s/r_п)^2/[12\,(1-\mu^2)]. \qquad (6.51)$$

В большинстве случаев, если не рассматривать металлы, испытывающие структурные превращения при невысоких температурах, остаточные напряжения $\sigma_{r\,ост}$ при $r=r_п$ примерно равны $\sigma_т/\sqrt{3}$. Если $\sigma_т/\sqrt{3} > \sigma_{r\,кр}$, то будет потеря устойчивости. Крупные листы (рис. 6.37, *б*) теряют устойчивость, имея по периметру обычно две впадины и две выпуклости. Чем меньше отношение наружного радиуса листа к $r_п$, тем больше волн возникает в листе.

Плоские днища также теряют устойчивость под действием радиальных напряжений сжатия (рис. 6.37, *в*).

Жесткость края цилиндрической оболочки в радиальном направлении намного меньше, чем жесткость днища в его плоскости. Поэтому радиальные напряжения сжатия $\sigma_{r\,сж} = P_{ус}/(rs)$, возникающие от усадочной силы в угловом соединении, почти полностью воспринимаются днищем. Критические напряжения для круглой, заделанной по контуру, пластины

$$\sigma_{r_{кр}} = 1{,}49\pi^2 E\,(s/r)^2/[12\,(1-\mu^2)]; \qquad (6.52)$$

в случае шарнирного опирания

$$\sigma_{r_{кр}} = 0{,}425\pi^2 E\,(s/r)^2/[12\,(1-\mu^2)]. \qquad (6.53)$$

Рассматриваемый случай является промежуточным, так как край оболочки, к которому приварено днище, нельзя

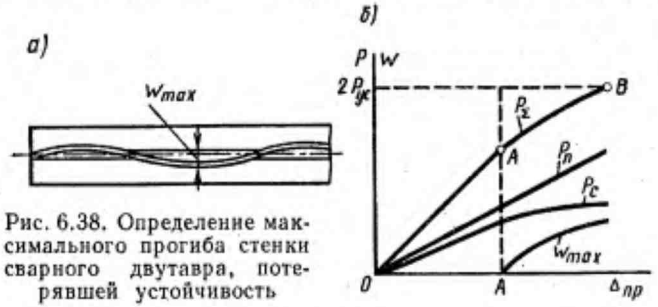


Рис. 6.38. Определение максимального прогиба стенки сварного двутавра, потерявшей устойчивость

считать жесткой заделкой. Оценку устойчивости можно дать по коэффициенту, значения которого находятся между 1,49. . .0,425, т. е. близкому к 1.

Тонкие листы ($s \leqslant 1$ мм) со стыковым соединением теряют устойчивость и в процессе сварки. Для предотвращения этого их прижимают к подкладке, оставляя минимальное расстояние l от зажимного клавиша до стыка, необходимое для прохода горелки и наблюдения (рис. 6.37, *г*).

Во многих случаях листовые элементы в сварных конструкциях все же теряют устойчивость. Если уровень выхода листов из плоскости не выше допустимого, то к правке не прибегают. Для определения перемещений при напряжениях выше критических необходимо располагать зависимостями между ними при $\sigma > \sigma_{кр}$.

Рассмотрим порядок решения задачи второго типа также на примере вертикальной стенки двутавра (рис. 6.38, *а*). Будем полагать, что пояса устойчивости не теряют. На графике (рис. 6.38, *б*) по горизонтальной оси

отложено продольное укорочение балки $\Delta_{пр}$ по мере роста усадочных сил в поясных швах. Продольная деформация $\varepsilon_{пр}=\Delta_{пр}/l$. В поясах будет линейно увеличиваться сила $P_п=2A_п\varepsilon_{пр}E$, где $2A_п$ — площадь поперечного сечения обоих поясов. В стенке до потери устойчивости (точка A)

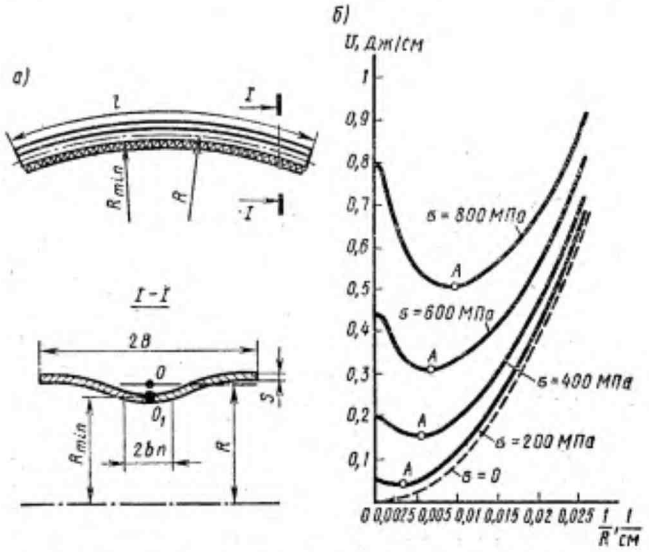


Рис. 6.39. Потеря устойчивости стыковых соединений

сила $P_с=A_с\varepsilon_{пр}E$ также будет расти линейно; за точкой A $P_с$ зависит от $\Delta_{пр}$ нелинейно. Сумма $P_п+P_с=P_у$ должна составить $2P_{ус}$ — это происходит в точке B. После потери устойчивости в точке A стенка будет искривляться (рис. 6.38, *а*), образуя волны с максимальным отклонением от оси w_{max}, которое также нелинейно зависит от $\Delta_{пр}$ и $\varepsilon_{пр}$. Если известны функции $P_с(\varepsilon_{пр})$ и $w_{max}(\varepsilon_{пр})$, то можно графически найти точку B, а затем и w_{max} в этой точке.

Листы со стыковым соединением представляют собой наименее жесткие элементы и легко теряют устойчивость. Искривление носит сложный характер (рис. 6.39, *а*) — имеется одинаковая кривизна $1/R$ по всей длине пластины l и переменная в поперечном сечении $I-I$. Такая форма объясняется тем, что лист, изгибаясь по дуге окружности, располагает зону $2b_п$ с растягивающими напряжениями на минимальном радиусе R_{min} и частично снижает потенциальную энергию собственных напряжений. Затраты

энергии на изгиб в двух направлениях меньше, чем изменение энергии от снижения собственных напряжений при разгрузке. Пластина занимает положение, обеспечивающее минимум потенциальной энергии в ней. На рис. 6.39, *б* дан график изменения потенциальной энергии в единице длины пластины в зависимости от кривизны $1/R$ при $2B=300$ мм, $2b_п=40$ мм, $s=1{,}5$ мм, $E=21\cdot10^4$ МПа, $\mu=0{,}3$ и различных начальных максимальных растягивающих напряжений σ в шве. Точки A соответствуют минимуму потенциальной энергии. При принудительном увеличении или уменьшении кривизны пластина после освобождения снова возвращается в положение устойчивого равновесия. Для пластины без остаточных напряжений (пунктирная линия) равновесие соответствует плоской форме. Момент усадочной силы на плече OO_1 (см. рис. 6.39, *а*) вызывает равномерное искривление сваренной пластины. Чем больше $P_{ус}$ и меньше s и B, тем сильнее искривляется пластина. Лишь очень узкие пластины ($2B\approx2b_п$) имеют малую кривизну. Тонкие листы после сварки практически всегда необходимо править, так как отклонения от плоскости достигают десятков миллиметров.

Потеря устойчивости возникает у многих сварных конструкций: в обшивках кораблей, металлических вагонов, предметах бытовой техники. Устранение перемещений достигается, как правило, правкой.

§ 6.5. ВЛИЯНИЕ СВАРОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ КОНСТРУКЦИЙ И ТЕХНОЛОГИЮ ИХ ПРОИЗВОДСТВА

Очень часто служебные свойства и работоспособность сварных конструкций практически не зависят от собственных сварочных напряжений и деформаций. Имеются, однако, примеры их выраженного отрицательного действия. В процессе конструирования, изготовления и эксплуатации сварных конструкций необходимо это учитывать.

Напряжения, пластические деформации и искажения формы конструкций специфическим образом ухудшают свойства изделий. Поэтому их влияние обычно изучают раздельно.

Влияние собственных напряжений и пластических деформаций. Остаточные напряжения и деформации могут влиять на получение и сохранение точных размеров и форм сварных конструкций, а также на их прочность и

работоспособность. Ниже перечислены наиболее типичные случаи.

1. Одним из видов отрицательного влияния сварочных напряжений является изменение размеров и форм сварных деталей. Чаще всего это изменение наблюдают в процессе механической обработки деталей с неснятыми после сварки остаточными напряжениями. Эти искажения происходят либо непосредственно во время обработки, либо в момент

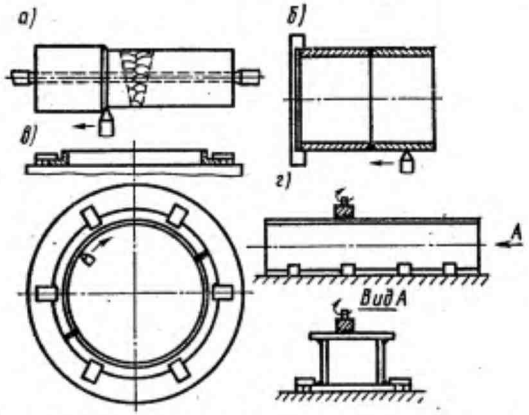


Рис. 6.40. Примеры механической обработки деталей, сопровождающейся их деформацией

съема детали со станка, либо в незначительной мере в процессе вылеживания после механической обработки. Во время механической обработки удаляют металл, в котором были собственные остаточные напряжения. Особенно значительны они в зоне пластических деформаций. Происходит нарушение равновесия внутренних сил. Если закрепление детали не мешает ей деформироваться, то изменение размера возникает сразу. При обточке наружной поверхности вала (рис. 6.40, *а*), сваренного многослойной сваркой, нарушается прямолинейность внутреннего отверстия, обработанного ранее. При обточке цилиндра (рис. 6.40, *б*) появляется бочкообразность внутренней поверхности вследствие частичного уменьшения окружной усадочной силы. При закреплении детали сварной шпангоут (рис. 6.40, *в*) после съема со стола утратит форму правильной окружности, а сварная балка (рис. 6.40, *г*) частично изогнется и не будет иметь плоской обработанной поверхности. В этих случаях требуется либо перекреплять детали перед финишными операциями (см. рис. 6.40, *в*, *г*), либо производить повторную обработку поверхностей с малыми объемами удаляемого металла (см. рис. 6.40, *а*, *б*).

Искажение формы обработанных поверхностей может происходить также в результате различия сил резания на закаленных и незакаленных участках зон неотпущенного сварного соединения.

В процессе вылеживания после механической обработки деформирование с течением времени может происходить потому, что перераспределение остаточных напряжений во время механической обработки могло вызвать пластические деформации в отдельных зонах и активизировать процесс релаксации.

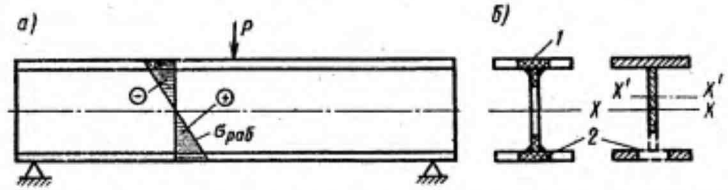


Рис. 6.41. Нагружение сварной балки с остаточными напряжениями

Изменение размеров в процессе эксплуатации может происходить под влиянием дополнительного силового воздействия на сварную деталь. Если сумма $\sigma_{ост}+\sigma_{раб}$ достигает предела текучести, возникает необратимая пластическая деформация. Нагружение детали может возникнуть в процессе перевозки и монтажа. Различают нагружение детали статическими и переменными (вибрационными) нагрузками. При статическом нагружении двутавровой балки силой P (рис. 6.41, *а*), имеющей зоны *1* и *2* (рис. 6.41, *б*) с остаточными растягивающими напряжениями, близкими к $\sigma_т$, рабочие напряжения $\sigma_{раб}$ вызывают пластическую деформацию в зоне *2* и она выключается из восприятия нагрузки. Прогиб балки при этом нагружении происходит так, как если бы сечение балки было без зоны *2* (рис. 6.41, *в*). При этом $J_x > J_{x'}$. Поэтому при приложении нагрузки возникает прогиб $f' = Ml^2/(8EJ_{x'})$, а при снятии нагрузки, когда пластических деформаций не будет, произойдет выпрямление $f = -Ml^2/(8EJ_x)$. Разность $f' - f = \Delta f$ даст остаточную деформацию.

Приложение вибрационных нагрузок также сопровождается суммированием остаточных и дополнительных напряжений с протеканием пластических деформаций. Виб-

рация может вызывать некоторое понижение предела текучести металла и усиливать искажение размеров по сравнению со статическими нагрузками при равном уровне приложенных сил.

Изменение размеров в процессе эксплуатации может происходить вследствие нестабильности структурного состояния металлов и релаксации напряжений. Следует, однако, сразу подчеркнуть, что эти изменения размеров имеют значения лишь для ряда машиностроительных и приборостроительных конструкций высокой точности. Изменение размеров происходит по двум причинам: во-первых, вследствие пластических деформаций в металле из-за наличия в нем остаточных напряжений и, во-вторых, вследствие изменения объема металла при медленном протекании структурных превращений в зонах со структурной нестабильностью, возникшей в процессе сварки.

Остаточные напряжения после сварки часто близки к пределу текучести металла. Именно в зонах с такими максимальными напряжениями и возникает пластическая деформация. Самопроизвольное изменение напряжений весьма мало. Измерения остаточных напряжений с точностью до 10. . .20 МПа на протяжении даже нескольких лет не показали их существенных изменений. Однако установлено, что в процессе релаксации напряжений при комнатной температуре в сталях с содержанием углерода 0,025. . .0,39% начальные напряжения в пределах 100. . .200 МПа через несколько лет снизились на 1,5. . .2,5%. Такие изменения недопустимо снижают точность высоко прецизионных устройств. Изменение остаточных напряжений во времени может усиливаться от естественного колебания температуры окружающей среды. При более высоких температурах процессы релаксации интенсифицируются. Возможно изменение уровня собственных напряжений из-за разных коэффициентов линейного расширения шва и основного металла в сварных соединениях, что также способствует усилению релаксации.

Структурная нестабильность является одной из основных и в ряде случаев существенных причин изменения размеров во времени. Аустенитные стали в процессе сварки не испытывают структурных превращений; низкоуглеродистые стали Ст3, 20 и им подобные слабо реагируют на изменение скорости остывания и завершают структурные превращения $\gamma \rightarrow \alpha$ при высоких температурах. В этих металлах структурная нестабильность обычно не возникает. Среднеуглеродистые стали и низколегированные

стали 35, 4Х13, 25ХГС, 30ХГСА, 12Х5МА и другие могут иметь в зоне структурных превращений, нагревающейся при сварке выше температуры A_{c_1} (около 800. . .850 °С), остаточный аустенит, распад которого во времени увеличивает объем металла. Если при сварке в результате очень быстрого переохлаждения аустенит практически полностью превращается в мартенсит (стали 35, 4Х13), то с течением времени идет процесс отпуска мартенсита закалки и объем

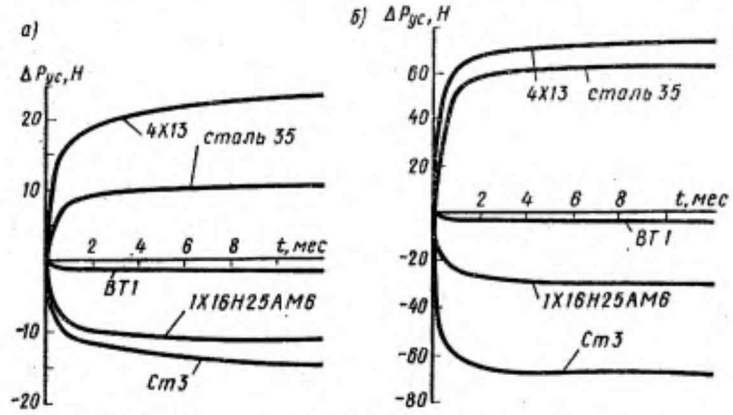


Рис. 6.42. Изменение усадочной силы с течением времени

металла уменьшается. Таким образом, при том или ином виде структурного превращения усадочная сила будет уменьшаться (при распаде остаточного аустенита) или увеличиваться (при отпуске мартенсита закалки).

Деформации во времени происходят также в сварных соединениях термически упрочняемых алюминиевых сплавов системы Al — Zn — Mg. В них протекают структурные изменения, связанные с распадом пересыщенного твердого раствора цинка и магния.

Характер изменения усадочной силы во времени при комнатной температуре, полученный на лабораторных образцах, показан на рис. 6.42, *а*. У титанового сплава ВТ1 и аустенитной стали 1Х16Н25АМ6, не испытывающих при сварке структурных превращений, а также у стали Ст3, структурные превращения в которой происходят при высоких температурах, усадочная сила уменьшается из-за пластических деформаций металла в процессе релаксации напряжений. В сталях 4Х13 и 35 усадочная сила растет вследствие уменьшения объема металла в зоне, где идет

процесс отпуска мартенсита закалки. Повышение температуры до 100 °С (рис. 6.42, *б*) усиливает как пластическую деформацию, так и отпуск мартенсита.

2. Растягивающие остаточные напряжения снижают вибрационную прочность сварных конструкций. Если они действуют в зонах, где есть концентрация напряжений и неоднородность механических свойств, то там в первую очередь возникают разрушения от усталости. Степень отрицательного влияния растягивающих напряжений зависит от уровня эксплуатационных напряжений и коэффициента концентрации напряжений. Чем выше рабочие напряжения и чем выше концентрация напряжений, тем меньше доля влияния растягивающих напряжений, и, наоборот, при невысоких рабочих напряжениях и малых концентрациях напряжений относительное отрицательное влияние растягивающих остаточных напряжений обнаруживается сильнее. Объясняется это тем, что остаточные напряжения взаимно уравновешены, и если произошла пластическая деформация, в результате которой они понизились, то собственные напряжения самопроизвольно не восстанавливаются. Поэтому при высоких рабочих напряжениях и высокой концентрации напряжений на первых же циклах нагрузки возникают пластические деформации от суммы рабочих и остаточных напряжений. Кроме того, значительная концентрация напряжений по своему влиянию превалирует над собственными напряжениями. При небольшой концентрации напряжений остаточные растягивающие напряжения сохраняют свой высокий уровень в процессе эксплуатации и увеличивают средние напряжения цикла, тем самым понижая выносливость.

3. Остаточные растягивающие напряжения могут понижать статическую прочность сварных соединений. Степень влияния зависит от свойств металла, его деформационной способности, уровня концентрации напряжений, предварительной пластической деформации металла. Если металл при рассматриваемой температуре мало чувствителен к концентрации напряжений и не испытал большой предварительной пластической деформации, то остаточные растягивающие напряжения не влияют на статическую прочность. В противном случае даже сами собственные напряжения могут вызвать самопроизвольные разрушения. Статическая прочность высокопрочных сталей с невысоким отношением критического коэффициента интенсивности напряжения к пределу текучести ($K_{Ic}/\sigma_т$) при наличии напряжений, близких к $\sigma_т$, и острых концентраторов может

существенно снижаться. Стали невысокой прочности, находясь в области температур вязкого состояния металла, практически нечувствительны к остаточным напряжениям. Исключение составляют случаи, когда в процессе сварки возникают очень большие пластические деформации, например в корне многослойного шва значительной толщины. Из-за пластической деформации металл изменяет свои свойства и имеет низкую деформационную способность.

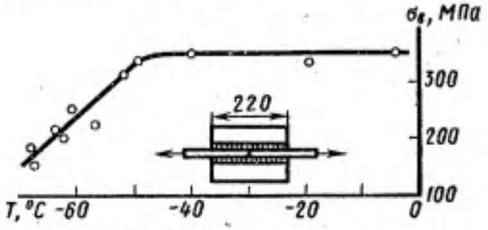


Рис. 6.43. Изменение предела прочности сварных крестовых образцов в зависимости от температуры

Стали невысокой прочности, находясь в области температур хрупкого или полухрупкого состояния, особенно если они испытали в процессе сварки деформационное старение, становятся крайне чувствительными к растягивающим остаточным напряжениям. На рис. 6.43 показано резкое падение прочности сварных образцов по мере перехода в область температур хрупкого состояния металла. Образец состоит из двух собранных с очень малым зазором пластин, к которым тавровым соединением приварены с двух сторон ребра длиной 220 мм и толщиной 16 мм. В ребре в зоне, расположенной у стыка пластин, возникают деформационное старение и высокие остаточные напряжения.

Остаточные напряжения, возникающие в глубине металла при сварке деталей толщиной более 150. . .200 мм, могут быть растягивающими по всем направлениям. В этом случае, несмотря на высокий уровень отдельных компонентов напряжений, пластическая деформация не будет возникать вследствие малой интенсивности напряжений:

$$\sigma_i = \sqrt{[(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2]/2}, \quad (6.54)$$

так как разности напряжений, входящие в формулу, малы. Возникает так называемая жесткая схема напряжений, при которой отдельные компоненты могут существенно превышать уровень предела текучести металла. Кроме

того, металл большой толщины менее однороден, чем тонкий; в нем могут быть скопления неметаллических включений, рыхлоты. Разрушение может произойти, когда напряжения достигнут критического уровня, который зависит от характера скопления микро- и макродефектов и свойств металла.

4. Сжимающие остаточные напряжения понижают местную устойчивость тонкостенных элементов сварных конструкций. При суммировании рабочих и остаточных напряжений потеря устойчивости может возникнуть при нагрузках меньше расчетных, а в некоторых случаях — даже от остаточных напряжений.

5. Коррозионное растрескивание, а иногда и процессы коррозии усиливаются под влиянием остаточных растягивающих напряжений как первого, так и более высоких родов.

6. Как будет рассмотрено ниже в гл. 7, остаточные растягивающие напряжения являются необходимым условием появления так называемых холодных трещин в закаливающихся сталях. Они возникают непосредственно после сварки в процессе вылеживания сварных конструкций.

7. Остаточные напряжения являются носителями энергии упругой деформации. При одноосных напряжениях энергия, запасенная в единице объема, пропорциональна квадрату напряжения:

$$U_1 = \sigma^2/(2E). \qquad (6.55)$$

Так как напряжения максимальны в зоне сварных соединений, то значительная часть энергии сосредоточена там. Начавшееся по каким-либо причинам разрушение в дальнейшем поддерживается энергией остаточных напряжений. Трещина может распространиться на значительную длину, сделав невозможным последующий ремонт разрушившейся детали. Энергия остаточных напряжений усиливает динамику процесса разрушения, увеличивает скорость движения трещин и способствует переходу от вязкого разрушения к хрупкому.

Влияние перемещений, вызываемых сваркой. Отрицательное влияние перемещений может обнаруживаться непосредственно в процессе изготовления сварной конструкции.

1. Перемещения свариваемых деталей создают деформации в зоне кристаллизующегося металла и могут привести к образованию горячих трещин (см. гл. 7).

2. Во время сварки в ряде случаев возникают перемещения в зоне формирования сварного соединения. При электрошлаковой сварке изменение зазора изменяет скорость сварки. Сварочный зазор может закрываться или открываться в таких пределах, что процесс может даже прерваться. При дуговой сварке тонкого металла из-за потери устойчивости возникает прожог листов. В результате перемещений при сварке кромки листов смещаются по толщине и образуют ступеньки. При сварке нахлесточных соединений возникшие ранее остаточные перемещения не позволяют деталям плотно прилегать друг к другу и сварка углового шва ведется в этом случае по зазору, что приводит к затеканию металла в зазор. Чтобы обеспечить соединение листов, необходимо завышать катет шва. При автоматической сварке угловых швов возможно даже их несплавление. При шовной сварке из-за ранее возникшей волнистости металл набегает впереди роликов и возникает непровар.

3. Перемещения элементов при сварке затрудняют последующий процесс сборки деталей между собой, а иногда делают ее невозможной без проведения дополнительной правки. Например, после сварки тонких листов ($s \leqslant 4$ мм) их приходится править, так как отклонения от плоскости велики и не позволяют проводить качественную сборку. Если тонкостенные оболочки имеют кольцевые швы, выполненные вблизи края, то это приводит к местному изменению диаметра, и при последующей сборке таких оболочек друг с другом возникает ступенька, что обычно недопустимо. При поузловой сварке часто возникают затруднения из-за несовпадения посадочных и присоединительных размеров собираемых после сварки узлов вследствие возникших перемещений. Искажения в пространстве бывают иногда настолько существенны и сложны, что приходится подгонку отдельных мест осуществлять вручную, а в некоторых случаях вынуждены проводить предварительную полную сборку, что уменьшает возможности механизации и автоматизации сварочного производства.

4. Из-за возникающих от сварки перемещений приходится назначать завышенные припуски на механическую обработку, чтобы иметь возможность обработать все предусмотренные чертежом поверхности. На рис. 6.44, *а* показан полый вал с угловым изломом 0 в зоне кольцевого шва. При значительной длине вала необходимо увеличить толщину стенки s, чтобы можно было провести обточку по всей длине. Рама на рис. 6.44, *б* имеет пропел-

лерность. Толщина платиков *1* должна быть увеличена, чтобы после механической обработки верхние поверхности всех платиков лежали в одной плоскости. Это увеличивает расход металла и время на обработку.

5. Некоторые виды перемещений изменяют геометрические характеристики сечений. Например, появление угла β (см. рис. 6.22) после выполнения поясных швов уменьшает момент инерции двутавровой балки вследствие

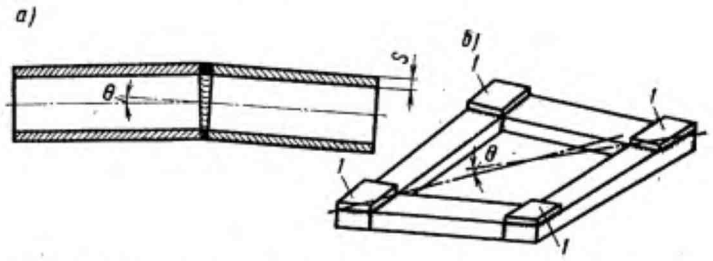


Рис. 6.44. Перемещения в сварных деталях, вызывающие увеличение припуска на механическую обработку

приближения краев полок к главной оси поперечного сечения. Изгиб колонн от сварки, окружные сокращения оболочек от кольцевых швов, уменьшение кривизны в оболочках в местах приварки к ним различных элементов создают при эксплуатации более высокие напряжения при тех же нагрузках вследствие появления не учтенных расчетом изгибающих моментов и растягивающих напряжений.

6. Начальные перемещения могут вызывать уменьшение устойчивости, в особенности местной. Общая устойчивость изогнутых колонн, сжатых труб с местными деформациями стенок также несколько снижается.

7. В летательных аппаратах, судах, энергетических установках перемещения, искажающие поверхности, которые обтекаются потоками газа или жидкости, увеличивают сопротивление потоку. В деталях машин и механизмов искажения размеров вызывают увеличение сил трения или даже заклинивание.

8. Значительные отклонения от правильных геометрических форм нарушают требования технической эстетики, ухудшают товарный вид таких технических изделий, как вагоны, автомобили, суда, предметы бытовой техники.

§ 6.6. МЕТОДЫ УМЕНЬШЕНИЯ СВАРОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ, ДЕФОРМАЦИЙ И ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В КОНСТРУКЦИЯХ

В основе известных методов уменьшения сварочных напряжений и искажений форм сварных конструкций лежат три основных способа их регулирования.

1. Уменьшение объема металла, вовлекаемого в пластическую деформацию на стадии его нагрева, и уменьшение самой пластической деформации.

2. Создание в зонах пластических деформаций, возникших от нагрева, дополнительных деформаций противоположного знака. Это может быть выполнено как при остывании, так и после полного охлаждения.

3. Компенсация возникающих деформаций и перемещений путем симметричного расположения швов, создания дополнительных зон пластических деформаций, предварительного перемещения, обеспечения свободной усадки и др.

Рассмотрим некоторые методы, используемые в производстве.

Подогрев при сварке изменяет поля температуры и сварочных деформаций, а также в ряде случаев и свойства металла, воздействуя на термический цикл. При этом изменяются напряжения, создаваемые структурными превращениями. В отношении пластических деформаций подогрев, с одной стороны, уменьшает предел текучести, модуль упругости и перепад температур. Это способствует уменьшению максимальных остаточных напряжений. С другой стороны, он расширяет зону пластических деформаций, если тепловложение при сварке остается прежним. При подогреве до очень высоких температур, при которых $\sigma_т$ мало, остаточные напряжения также весьма малы.

Проковка применяется как в процессе сварки по остывающему металлу, так и после полного остывания. Проковкой осаживают металл по толщине, создавая пластические деформации удлинения в плоскости, перпендикулярной направлению удара. Этим достигают уменьшения растягивающих или даже появления сжимающих остаточных напряжений. Эффект от проковки зависит от температуры, количества теплоты, которое выделяется при проковке, и значения пластической деформации. Если температура в зоне проковки выше, чем в остальном (непрокованном) металле, то в процессе последующего остывания и температурного сокращения металла сжимающие напряжения будут уменьшаться и могут перейти

даже в растягивающие. При холодной проковке нагрев обычно невелик и можно создать высокие сжимающие напряжения. Проковка ведется механизированным инструментом с малыми (6. . .7 м/с), средними (до 100 м/с) и высокими (более 100 м/с) скоростями движения бойка. Проковка маневренна, в этом ее преимущество перед другими методами. Следует опасаться снижения пластичности металла при проковке.

При импульсной обработке взрывом используют заряды ленточного типа, которые укладывают на обрабатываемые поверхности. Взрыв, который проводят в специальной камере, создает напряжения в поверхностном слое. Применяется этот метод как средство повышения выносливости сварных соединений при переменных нагрузках. При такой обработке происходит перераспределение остаточных напряжений.

Прокатка зоны сварного соединения используется главным образом для уменьшения остаточных перемещений или для заглаживания швов. В местах прокатки растягивающие напряжения уменьшаются и могут стать сжимающими.

Приложение нагрузок. Во время сварки нагрузки прикладывают так, чтобы в зоне сварки создать растягивающие напряжения. Это уменьшает остаточные напряжения растяжения и усадочную силу $P_{ус}$. Если нагружение производится после сварки, необходимо, чтобы напряжения от нагрузки складывались с остаточными растягивающими напряжениями и вызывали пластические деформации. После снятия нагрузки напряжения снижаются. Для полного снятия собственных напряжений напряжения от нагрузки должны быть близки к пределу текучести металла, что обычно трудно достижимо.

Применяют как статическое, так и вибрационное нагружение. В последнем случае напряжения снижаются незначительно, но этого бывает достаточно, чтобы в дальнейшем сумма рабочих и остаточных напряжений не искажала размеров конструкций при эксплуатации.

Создание неравномерных нагревов и охлаждений. Если создать с двух сторон сварного соединения нагретые зоны, то металл, расширяясь, вызовет растяжение вдоль шва и сжатие поперек шва. Такая схема напряжений благоприятна для протекания пластических деформаций в направлении вдоль шва, что как раз необходимо для снятия остаточных растягивающих напряжений. Перемещая зоны нагрева вдоль шва, охлаждая металл позади источника теплоты, процесс можно сделать непрерывным.

Если создавать концентрированное охлаждение участка с растягивающими напряжениями, то он будет сокращаться и вызывать суммирование остаточных напряжений с растягивающими напряжениями от охлаждения. Это вызовет пластическую деформацию и последующее снижение остаточных напряжений после выравнивания температур.

Местный концентрированный нагрев отдельных зон применяют, чтобы вызвать усадку металла в месте нагрева и создать напряжения сжатия в соседних зонах. Как средство регулирования напряжений он находит ограниченное применение, но для правки конструкций такой прием используют широко.

Отпуск сварных конструкций применяют для изменения структуры и свойств металла, а также для снижения остаточных напряжений. Применение отпуска для снижения остаточных напряжений целесообразно, если предъявляются повышенные требования к прочности сварной конструкции и точности ее размеров при последующей эксплуатации. Кроме того, иногда целесообразно восстановить пластические свойства в зонах, где концентрировались пластические деформации при сварке, и повысить сопротивляемость хрупким разрушениям. В остальных случаях применение отпуска не рекомендуется из-за повышения стоимости производства конструкций.

Различают: *общий* отпуск, когда равномерно нагревают изделие целиком; *местный* — нагревают лишь часть конструкции в зоне сварного соединения; *поэтапный* — источник нагрева движется вдоль конструкции, например трубы или оболочки, и последовательно нагревает ее участки; *поэлементный* — термической обработке подвергают узлы сварной конструкции, а затем сваривают их между собой. Основное достоинство отпуска как метода снижения остаточных напряжений в том, что он не вызывает пластических деформаций, которые бы уменьшали пластичность металла.

Операция отпуска состоит из четырех стадий: нагрева, выравнивания температур, выдержки и остывания. В основном напряжения снимаются на стадии нагрева (рис. 6.45). Степень снижения напряжений зависит в основном от достигнутой температуры и мало зависит от скорости нагрева. В процессе выдержки происходит дополнительно некоторое снижение напряжений σ_i, которое происходит

в соответствии с формулой

$$\sigma_i = \sigma_{0_B}(1 + t/t_0)^{\beta}, \qquad (6.56)$$

где σ_{0_B} — напряжение в начале выдержки, т. е. в конце стадии нагрева; t — время выдержки, мин; $t_0 = 10$ мин — постоянная величина; β — коэффициент, зависящий от

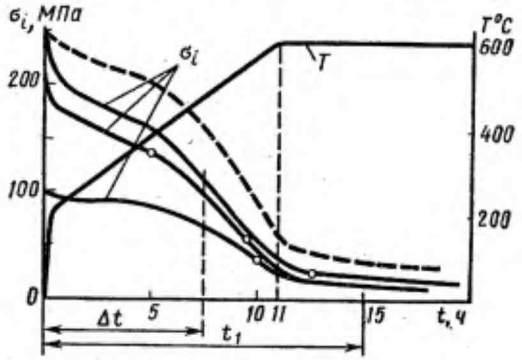


Рис. 6.45. Снижение интенсивности напряжений σ_i (сплошные кривые) и трехосных напряжений в сварном соединении большой толщины (пунктирная кривая)

марки стали и температуры, изменяется в пределах —0,08. . .—0,16.

Длительная выдержка как средство снижения напряжений не рекомендуется. Более эффективно несколько повысить температуру отпуска. Нужно назначать такую температуру отпуска для снижения напряжений, чтобы исключить возможность охрупчивания стали.

Как указывалось выше, при сварке и термической обработке массивных деталей в глубине металла возникают объемные напряжения. Их уменьшение происходит в значительной мере из-за пластических деформаций и релаксации напряжений в приповерхностных слоях, а не в глубине металла. Ползучесть металла на поверхности вызывает перераспределение напряжений, и происходит их снижение во всем объеме тела. Следует, однако, иметь в виду, что максимальные напряжения в областях с объемным напряженным состоянием все же в 2. . .2,5 раза выше (см. рис. 6.45), чем при одноосной или двухосной схеме напряжений. Увеличение продолжительности выдержки в этих случаях не дает положительного эффекта,

так как замедление релаксации напряжений на поверхности является причиной такого же замедленного снижения напряжений в глубине. Температуры отпуска (°С), обеспечивающие снижение остаточных напряжений до уровня $(0{,}1. . .0{,}2)\sigma_т$, для различных металлов находятся в следующих пределах:

Магниевые сплавы	250...300
Алюминиевые сплавы	250...300
Титановые сплавы	550...600
Конструкционные стали	580...680
Аустенитные стали	850...1050
Ниобиевые сплавы	1100...1200

Меры по уменьшению деформаций и перемещений от сварки предусматриваются на всех этапах проектирования и изготовления большинства сварных конструкций.

На стадии разработки проекта нужно принимать такие конструктивные решения, которые бы позволили технологу избежать значительных искажений сварной конструкции и организовать при необходимости правку.

1. Назначают минимальные объемы наплавляемого металла; сечения угловых швов следует принимать по расчету на прочность или в соответствии с рекомендациями о минимальных катетах швов. Площадь поперечного сечения и погонная энергия при однопроходной сварке, усадочная сила и поперечная усадка обратно пропорциональны квадрату катета шва k^2.

2. Используют способы сварки с минимальным тепловложением, например контактной вместо дуговой, многопроходной вместо однопроходной. При назначении вида сварки следует иметь в виду допустимые скорости охлаждения металла и не превышать их.

3. Балочные конструкции проектируют с таким поперечным сечением и расположением швов, чтобы моменты, создаваемые усадочными силами, были уравновешены, а углы излома φ от поперечных швов взаимно компенсировали прогибы. Это обеспечивает минимальный изгиб балок.

4. Следует стремиться к таким последовательностям сборочно-сварочных операций, при которых моменты инерции и площади поперечных сечений во время выполнения тех или иных швов были по возможности максимальными. Например, последовательное наращивание элементов в сложных конструкциях дает большие искажения размеров, чем сборка всей конструкции на прихватках, а затем сварка.

5. В некоторых случаях целесообразно обеспечить свободное сокращение элементов от усадки, чтобы не вызвать искажений конструкции в целом. Например, нахлесточное, еще не сваренное соединение позволяет смещаться листам, не передавая остальной части конструкции усадку. Стыковое соединение листов выполняется до прикрепления их к другим частям конструкции, обеспечивая возможность беспрепятственной поперечной усадки швов.

6. В конструкциях с тонкостенными элементами швы располагают либо на жестких элементах, либо вблизи них.

7. Во всех случаях, когда есть опасение, что возникнут нежелательные искажения размеров и формы конструкции, проектирование ведут так, чтобы обеспечить возможность последующей правки.

При разработке технологии и осуществлении сварки используют следующие мероприятия:

1. Применяют рациональную последовательность сборочно-сварочных операций, которая либо предусмотрена проектом конструкции, либо выбрана технологом в пределах имеющихся у него возможностей. Например, конструкцию расчленяют на отдельные узлы, которые могут быть по отдельности легко выправлены, а затем сварены между собой с минимальными отклонениями. Определенной последовательностью наращивания элементов сложной балочной конструкции также можно уменьшить искажения. Сборку целесообразно вести от наиболее жесткого элемента.

2. Назначают экономичные способы и режимы сварки с минимальным тепловложением и таким характером искажений, который безвреден для качества конструкции. Например, если недопустим излом длинной трубы в зоне кольцевого шва, то применяют многопроходную сварку. Регулированием скорости охлаждения и химического состава металла шва изменяют характер структурных превращений и усадочную силу.

3. Применяют соответствующую оснастку и приспособления для сборки и закрепления свариваемых элементов. Они особенно эффективны для ликвидации временных перемещений, которые значительны по размеру, но не сопровождаются большими усадочными силами, например, прижатие тонких листов при сварке стыковых соединений, закрепление ребер и диафрагм при выполнении угловых швов, удержание листа в плоскости при контактной точечной сварке и шовной сварке, фиксация элементов рамы при сварке ее в углах и пересечениях.

4. Назначают размеры заготовок с учетом последующей усадки, например, выставление переменного по длине зазора при электрошлаковой сварке (рис. 6.46, *а*); компенсация угла при сварке стыковых соединений (рис. 6.46, *б*) создание предварительной кривизны балки (рис. 6.46, *в*) путем выкраивания стенки с кривизной, натяжение Δ

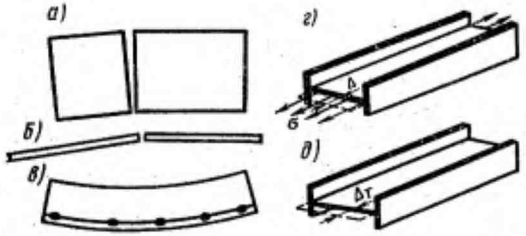


Рис. 6.46. Создание перемещений, противоположных сварочным

(рис. 6.46, *г*) или термическое удлинение $\Delta_т$ стенки двутавра (рис. 6.46, *д*), чтобы она при последующей усадке не потеряла устойчивости.

5. Предварительной пластической деформацией заготовок перед сваркой создают перемещения, противоположные ожидаемым при сварке. Например, изгибают полки, чтобы уменьшить грибовидность от укладки продольных швов в балке, раскатывают края обечаек перед сваркой кольцевых швов, изгибают в штампах края отверстий в оболочках, чтобы компенсировать последующее перемещение соединения к оси оболочки.

6. Искусственным охлаждением, к которому относятся подача воды при контактной сварке; обдув газоводяной смесью при некоторых способах сварки; использование охлаждаемых подкладок и накладок в зажимных приспособлениях, уменьшают зону пластических деформаций.

7. Создают в зоне сварки с помощью приспособлений или специальных установок напряжения растяжения (обычно путем изгиба, реже растяжением), чтобы уменьшить усадочную силу. Такой прием используют при сварке балок.

8. Создают непосредственно после сварки пластические деформации удлинения проковкой металла специальным инструментом или сварочным электродом при точечной контактной сварке.

Для правки конструкций после сварки используют различные механические и термические способы.

Механические способы основаны на создании пластических деформаций удлинения с целью компенсации пластических деформаций укорочения, вызванных сваркой, и включают гибку, растяжение, проковку, статическое осаживание металла по толщине под прессом для его удлинения в плоскости, вибрацию, прокатку. При этом не стремятся к тому, чтобы обеспечить равномерное уменьшение пластических деформаций и остаточных напряжений в зоне сварного соединения. Необходимо, чтобы усадочная сила стала близкой к нулю.

Рассмотрим подробно, как происходит устранение деформаций в тонколистовых сварных конструкциях прокаткой зоны сварного соединения цилиндрическими роликами. Прокатка создает пластическую деформацию металла по толщине и приводит в основном к удлинению металла в продольном и частично в поперечном направлениях. В подавляющем большинстве случаев остаточные пластические деформации, вызванные сваркой, сосредоточены только в шве и зоне термического влияния т. е. на участке сравнительно небольшой ширины $2b_п$. В остальных частях сварной конструкции деформации упругие. Чтобы устранить деформации во всем изделии, достаточно создать при прокатке пластические деформации, равные по значению, но противоположные по знаку сварочным только в пределах зоны $2b_п$.

Прокатка производится стальными роликами шириной 5. . .15 мм. Поскольку удлинение металла в поперечном направлении невелико, устраняются деформации, вызванные продольной усадкой.

На рис. 6.47, *а* показана эпюра распределения напряжений σ_x в непрокатанном шве; на рис. 6.47, *б*. . .*г* — эпюры σ_x после прокатки в разных режимах. Растягивающие напряжения могут понизиться, оказаться близкими к нулю или даже перейти в сжимающие. Остаточное напряжение $\sigma_{кон}$ в прокатанной зоне зависит от многих факторов. Связь между напряжениями в металле и параметрами режима прокатки узкими роликами выражается следующей формулой:

$$P^2/b^2 = \frac{6{,}7ds\sigma_т(\sigma_{кон}-\sigma_т)^2(\sigma_{нач}-1{,}5\sigma_{кон}+0{,}5\sigma_т)}{E(0{,}7\sigma_т+0{,}3\sigma_{нач})}, \quad (6.57)$$

где P — усилие на ролики; d — диаметр роликов; b — ширина рабочего пояска роликов; s — толщина металла

в зоне прокатки; $\sigma_т$ — предел текучести металла в зоне прокатки; E — модуль упругости; $\sigma_{нач}$ — начальные остаточные напряжения в металле перед прокаткой.

При известных параметрах режима прокатки и $\sigma_{нач}$ по формуле (6.57) можно определить остаточное напряжение после прокатки. Формула справедлива, если $\sigma_{кон} > -0{,}7\sigma_т$.

Экспериментально и расчетным путем показано, что для каждого металла при заданных размерах роликов и

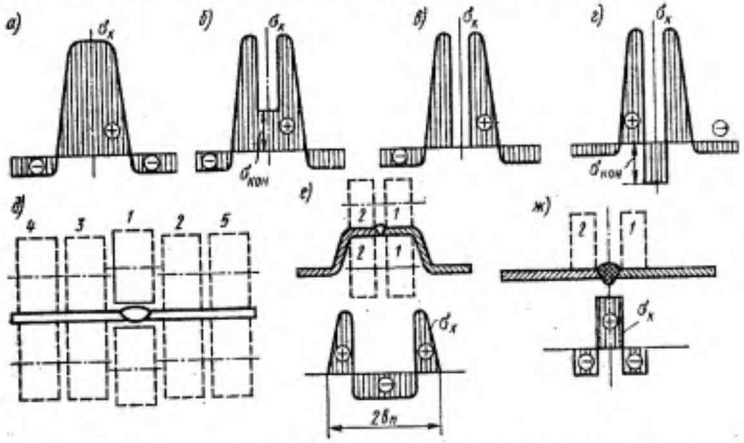


Рис. 6.47. Изменение продольных напряжений σ_x при различных приемах прокатки зоны сварного соединения

толщине металла в зоне прокатки существует определенное усилие на ролики P_0, при котором остаточные напряжения, равные до прокатки примерно пределу текучести, снижаются после прокатки до нуля. Утонение металла при этом составляет около 0,5. . .1%. На основании формулы (6.57), если $\sigma_{нач} \approx \sigma_т$, а $\sigma_{кон}=0$, для определения P_0 получена формула

$$P_0 = b\sqrt{10{,}1ds\sigma_т^3/E}. \quad (6.58)$$

Вычисленное по формуле (6.58) усилие на ролики P_0 должно уточняться при правке конкретного изделия.

Если ширина зоны пластических деформаций, вызванных сваркой, велика, а ролик узкий, то зону термического влияния необходимо прокатывать последовательно (рис. 6.47, *д*) с порядком положения роликов 1. . .5. В случае невозможности прокатать всю зону пластических деформаций $2b_п$ (рис. 6.47, *е*) необходимо создать перекат

в зоне, доступной для прокатки (положение роликов *1* и *2*), назначая $P > P_0$ так, чтобы собственные напряжения были уравновешены в пределах узкой зоны и не передавали сжимающие усилия на остальную часть конструкции. Если в шве нежелательно снижать пластические свойства металла при прокатке (рис. 6.47, *ж*), то прокатывают при повышенных усилиях только зону термического влияния, добиваясь устранения деформаций за счет напряжений сжатия в зоне термического влияния. Для нахлесточных соединений суммарная толщина $s_{\text{расч}}$ при использовании формул (6.57) и (6.58) равна $2s$. Прокатка может применяться и для устранения деформаций от точечных сварных соединений.

Если прокатка не дает достаточного исправления, то ее можно повторить. Повторная прокатка по одному и тому же месту при неизменном усилии вызывает затухающую пластическую деформацию, составляющую не более 10. . .15% от деформации предыдущего пропуска. Для получения большей пластической деформации при повторных прокатках следует повысить усилие. Механическая правка прокаткой требует высокого качества сборки перед сваркой и определенной очередности сборки, сварки и правки. Если сварка одного из швов не ухудшает качества сборки второго, то исправление может выполняться после сварки обоих швов.

Устранение деформаций прокаткой осуществляется на элементах толщиной до 8. . .12 мм, но возможно и на бо́льших толщинах. Для получения равномерной пластической деформации металла по толщине s отношение d/s не следует принимать менее 15. . .20. Прокатка может применяться на изделиях из сталей, титановых и алюминиевых сплавов. Не рекомендуется применять прокатку для конструкций из малопластичных материалов. При наличии коррозионной среды требуется проверка влияния прокатки на коррозионную стойкость сварных соединений.

Термические способы также основаны на создании пластических деформаций необходимого знака. При местных нагревах (так называемая термическая правка) создают пластические деформации укорочения. Это означает, что нагрев, как правило, должен проводиться вне зон пластических деформаций, возникших при сварке. Например, в изогнутых балках нагревают более длинную сторону (рис. 6.48, *а*) и вызывают обычную усадку металла, как при сварке. Усадочная сила после местного нагрева выпрямляет балку. В листах, потерявших устойчивость от

напряжений сжатия (рис. 6.48, *б*), создают нагревы и усадку в зонах сжатия. Сокращение листа в результате термической правки и последующего остывания обеспечивает его выпрямление. Углеродистые стали обычно нагревают газовым пламенем до 600. . .800 °С. Нагрев ведут пятнами или полосами. Необходимо стремиться к кратковременному и концентрированному нагреву, чтобы соседние зоны оставались ненагретыми и сопротивлялись расширению нагретого металла, вызывая в нем усадку.

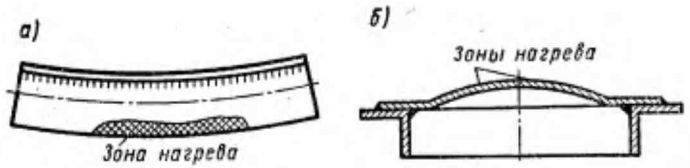


Рис. 6.48. Использование местного нагрева для создания усадки металла

О результатах правки можно судить лишь после полного остывания конструкции. Листовые элементы иногда после нагрева осаживают молотками на плоскость. Так как нагретый металл имеет низкий предел текучести, то он легко осаживается и в нем при этом возникают пластические деформации укорочения.

Успех правки зависит от квалификации и опыта правщика, так как технологу трудно регламентировать и контролировать все параметры правки. Благодаря простоте, универсальности и маневренности термическая правка нашла широкое применение в производстве.

Термическая правка путем общего нагрева детали при отпуске без использования приспособлений невозможна, так как напряжения снижаются как в зонах растяжения, так и в зонах сжатия. Равновесие сил почти не нарушается, а следовательно, перемещения сохраняются. Если с помощью жесткого приспособления детали придать нужную форму, а затем поместить ее вместе с приспособлением в печь, то будет происходить релаксация напряжений до низкого уровня. При освобождении детали из приспособления после отпуска она не деформируется и сохраняет ту форму, которую ей придали. К этому, довольно дорогому способу правки прибегают в тех случаях, когда другими методами не удается добиться необходимого эффекта.

Контрольные вопросы к главе 6

1. Что такое собственные напряжения?
2. Чем отличаются наблюдаемые деформации от температурных?
3. Назовите основные допущения относительно механических свойств металлов при высоких температурах, используемые в простейших методах расчета сварочных напряжений.
4. Каков примерно уровень максимальных продольных остаточных напряжений σ_x в однопроходных сварных соединениях из низкоуглеродистых сталей и некоторых цветных сплавов?
5. Что такое ширина зоны пластических деформаций при сварке, каков примерно ее размер в стыковых соединениях низкоуглеродистых сталей?
6. Чем отличаются распределения остаточных напряжений в стыковых соединениях металла большой толщины при многослойной и электрошлаковой сварке по сравнению с распределениями напряжений в однопроходных соединениях толщиной до 10. . . . . 15 мм?
7. Назовите основные виды остаточных пластических деформаций и перемещений в зоне сварных соединений.
8. Что такое усадочная сила и в каких расчетах она используется?
9. Что такое поперечная усадка (равномерная, неравномерная), какие искажения размеров и формы сварных деталей она вызывает?
10. Какие виды перемещений пластин возникают в процессе сварки встык?
11. Какие виды искажений формы и размеров балок могут возникать в результате их сварки?
12. Назовите основные виды искажений формы сварных оболочек, возникающие при сварке, и причины их образования.
13. Какие виды потери устойчивости сварных элементов вы знаете и почему они возникают?
14. Как определить возможность потери устойчивости листового элемента от остаточных напряжений?
15. Рассчитайте ожидаемый прогиб балки длиной 10 м, имеющей сечение в виде тавра, сечением полос 200×10 мм после автоматической сварки под флюсом двумя поясными швами с катетом 8 мм.
16. Какие основные виды отрицательного влияния остаточных напряжений в сварных конструкциях вы можете назвать?
17. Какие основные виды отрицательного влияния деформаций сварных конструкций вам известны?
18. Назовите основные приемы, используемые для уменьшения деформаций конструкций при сварке.
19. Каковы основные особенности снижения остаточных напряжений при отпуске сварных конструкций?
20. Какие методы исправления деформаций конструкций после сварки вам известны?
21. Что такое термическая правка, какие разновидности ее вам известны?
22. В чем состоит правка сварных конструкций прокаткой роликами?

ГЛАВА 7

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

§ 7.1. ГОРЯЧИЕ ТРЕЩИНЫ

Под технологической прочностью сварных соединений понимают их способность выдерживать без разрушения различного рода воздействия, которые могут возникнуть в процессе сварки, остывания или вылеживания сварных конструкций под влиянием сварочных деформаций и напряжений.

Различают так называемые горячие трещины, которые представляют собой межкристаллические разрушения, возникающие во время кристаллизации металла, а также при высоких температурах в твердом состоянии из-за вязкопластической деформации, и холодные трещины, природа которых может быть различной. У многих низколегированных и легированных сталей они образуются под влиянием фазовых превращений в твердом состоянии после окончания процесса сварки в течение последующих нескольких суток. В процессе сварки и остывания могут возникнуть также деформационные трещины, вызванные исчерпанием пластичности металла в концентраторах напряжений.

Исследованиями установлено, что в процессе сварки в зоне затвердевания расплавленного металла в большинстве случаев возникают напряжения растяжения вследствие образующихся деформаций удлинения металла. Собственные (внутренние) деформации ε в соответствии с формулой (6.2) равны разности наблюдаемых $\varepsilon_н$ и температурных ε_α деформаций, т. е.

$$\varepsilon = \varepsilon_{упр} + \varepsilon_{пл} = \varepsilon_н - \varepsilon_\alpha. \qquad (7.1)$$

Структура формулы (7.1) показывает, что одной из причин появления деформаций удлинения является температурная усадка металла, выражаемая величиной ε_α. Если температура понижается, т. е. $\Delta T<0$, то значение $-\varepsilon_\alpha=-\alpha\Delta T$ положительно. Следовательно, даже при $\varepsilon_н<0$ может возникать деформация удлинения. Деформации удлинения будут еще больше, если $\varepsilon_н>0$. Значения $\varepsilon_н$ становятся положительными вследствие сложных процессов нагрева и охлаждения соседних участков. Значения $\varepsilon_н$ зависят также от формы свариваемых деталей и их

закрепления. Например, при приближении шва к краю пластины (рис. 7.1, *а*) происходит расширение металла в направлении сварки v_c и резкое увеличение размера l в зоне кристаллизующегося металла ванны при развороте кромок. Узкие пластины (рис. 7.1, *б*) при сварке сильно изгибаются от неравномерного нагрева и создают удлинение металла в районе участка l_1 рядом со сварочной ванной; одновременно по той же причине происходит

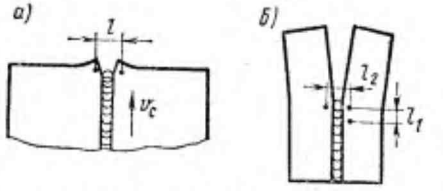


Рис. 7.1. Примеры образования значительных деформаций удлинения кристаллизующегося металла в процессе сварки

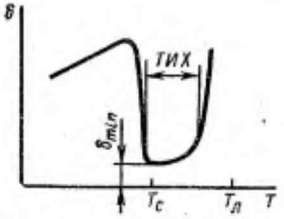


Рис. 7.2. Зависимость пластичности металла δ от температуры T

увеличение размера l_2. Механические испытания металлов при высоких температурах показывают, что пластичность металла δ в некотором интервале температур солидуса T_c и ликвидуса $T_л$ очень мала (рис. 7.2). Этот интервал получил название температурного интервала хрупности (ТИХ). Наличие ТИХ, в котором минимальная пластичность δ_{min} может снижаться до 0,1. . .0,5%, является одной из основных причин образования горячих трещин. За период пребывания металла в этом интервале могут накопиться такие деформации удлинения, которые превзойдут уровень пластичности в ТИХ. Возможность образования горячих трещин тем больше, чем меньше пластичность металла в ТИХ, чем шире ТИХ и чем больше темп α^* собственных (внутренних) деформаций удлинения ε при сварке. Под темпом понимают частную производную деформации по температуре $\alpha^* = \frac{\partial \varepsilon}{\partial T}$. У некоторых сплавов могут быть два или даже три температурных интервала хрупкости. При этом второй и третий интервалы проявляются при температурах ниже T_c.

Горячие трещины возникают как в швах, так и вблизи линии сплавления в зоне термического влияния. Они могут располагаться как вдоль, так и поперек шва.

Образование трещин зависит главным образом от состава металла шва и основного металла, формы и размеров свариваемого узла конструкции, режимов и условий сварки. Существуют разнообразные методы и приемы определения сопротивляемости сварных соединений образованию горячих трещин. В начале развития исследований технологической прочности пригодность металлов и принятой технологии для производства сварных конструкций определяли только путем пробы, т. е. сварки специально подобранного образца или серии образцов. В разных странах было разработано много разнообразных сварочных технологических проб. Они отличаются между собой формой образца и условиями сварки. В каждой из проб принят определенной формы образец, который должен обеспечивать по возможности больший уровень ε по формуле (7.1), чтобы заведомо создавать больший темп деформаций в шве в период кристаллизации металла. Была распространена точка зрения, что этого можно достичь, как правило, сваркой швов в образцах высокой жесткости. Впоследствии было показано [5], что в пластинах небольшой ширины (рис. 7.1, *б*) вследствие их значительного изгиба можно вызвать при сварке большие темпы деформаций в шве. Например, на рис. 7.3, *а*, *б* показаны образцы некоторых проб, в которых трещины возникают вследствие повышенной деформации изгиба образцов при их сварке (рис. 7.3, *а*) или проплавлении (рис. 7.3, *б*). Сваривая образцы различной ширины B (рис. 7.3, *а*), можно получить трещины большей или меньшей длины l. При сварке образца (рис. 7.3, *б*) находят $B_{кр}$ — ширину, начиная с которой образуются трещины. Если сваривается металл, хорошо сопротивляющийся образованию горячих трещин, и применяются достаточно высококачественные сварочные материалы, то горячие трещины в образцах проб могут и не образовываться. В этом случае остается открытым вопрос о фактической сопротивляемости металла образованию горячих трещин. Для интенсификации процесса образования деформаций с целью получения горячих трещин в лабораторных условиях образцы в процессе сварки могут дополнительно деформироваться испытательной машиной, которая создает за определенный промежуток времени в дополнение к деформациям ($\varepsilon_п$—ε_α) машинную деформацию $\varepsilon_м$. На рис. 7.3, *в*, *г* показаны примеры образцов, которые дополнительно нагружаются машиной во время сварки. На рис. 7.3, *в* образцы непосредственно в процессе укладки валика закручивают в направлении φ,

а на рис. 7.3, *г* растягивают с заданной скоростью деформации, при этом сопротивляемость швов образованию горячих трещин оценивают длиной трещины $l_{тр}$.

Один из простейших способов оценки качества металла по его сопротивляемости образованию горячих трещин состоит в том, что сваривают узел конструкции, наиболее подверженный образованию трещин, и определяют наличие

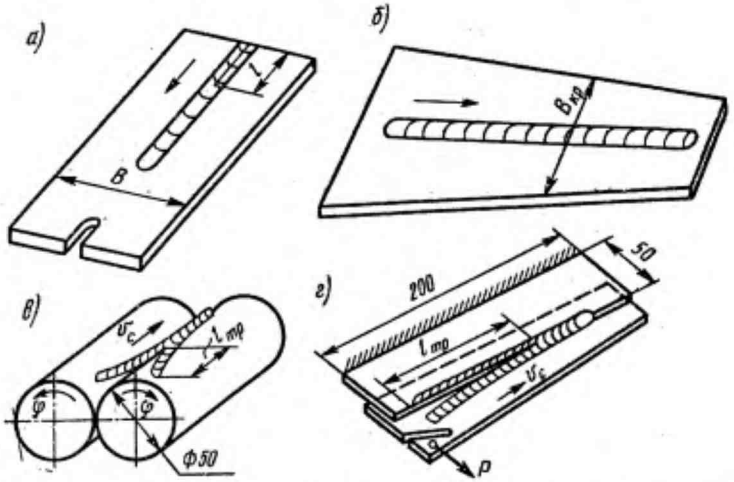


Рис. 7.3. Образцы для испытаний на технологическую прочность

в нем трещин. При сравнении двух металлов или вариантов технологии таким методом невозможно судить, какой из них лучше, если трещин нет вовсе. В этом один из основных недостатков такого подхода. В ряде проб оценку ведут по длине образующейся в образце трещины. Чем длиннее трещина, тем хуже металл.

В качестве признака оценки используют также минимальный или максимальный размер образца, при котором появляются горячие трещины. Например, проваривают пластины разной ширины или с различной глубиной боковых прорезей.

Известны приемы оценки условий сварки, когда одни и те же образцы сваривают с разной погонной энергией или с различной скоростью сварки. Определяют неблагоприятные условия, и в дальнейшем назначают такие режимы, которые наиболее удачны в отношении сопротивляемости образованию трещин.

Как видно на примере нескольких упомянутых проб (см. рис. 7.3), они могут быть предназначены либо для качественной, либо для количественной сравнительной оценки сопротивляемости образованию горячих трещин.

Более совершенными методами количественной оценки технологической прочности являются машинные методы. Один из них состоит в растяжении с различными скоростями затвердевающего металла шва с целью определения критической скорости $v_{кр}$ перемещения захватов машины, достаточной для возникновения горячих трещин. При этом $v_{кр}=\Delta_{кр}/\Delta t$, где $\Delta_{кр}$ — перемещение в ТИХ, приводящее к образованию трещины; Δt — время пребывания металла в ТИХ. Существуют разные приемы реализации этого метода, например путем растяжения образца при сварке стыкового соединения или его изгиба (рис. 7.4). Другой более точной мерой сопротивляемости металла образованию горячих трещин является критический темп деформации $\alpha^*_{кр}$, определяемый приближенно как отношение критического значения перемещения кромок свариваемых элементов за время деформирования в ТИХ к значению ТИХ [5, 6].

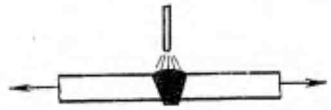


Рис. 7.4. Схема растяжения образца в процессе сварки

Горячие трещины образуются не только в сталях, но и в сплавах на основе других металлов, в частности алюминия. В табл. 7.1 приведены результаты испытаний сварных соединений из алюминиевых сплавов с целью определения уровней $v_{кр}$. Чем выше $v_{кр}$, тем выше сопротивляемость сплава образованию горячих трещин.

Для оценки принятых конструктивных форм по их способности сопротивляться образованию горячих трещин применяют так называемую оценку по эталонному ряду электродов. Используя сварочные материалы с заранее определенными для них и разными $v_{кр}$ или $\alpha^*_{кр}$, сваривают одинаковые типовые узлы сварной конструкции и определяют тот уровень v или α^*, при котором в сварном узле появляются горячие трещины. Найденные значения величин являются показателем уровня возникающих в сварных соединениях темпов собственных деформаций при сварке и признаком степени совершенства конструктивных решений и принятой технологии сварки. Если трещины появляются при сварке электродами с высоким уровнем $v_{кр}$, то это означает, что в данном узле при сварке раз-

Таблица 7.1

Показатели сопротивляемости сварных соединений образованию горячих трещин

Основной металл	Присадочный металл	$v_{кр}$, мм/мин	Основной металл	Присадочный металл	$v_{кр}$, мм/мин
АМг3М	АМг3	10,5 *	АМгМ	АМгМ	3,7 *
АМг6М	АМг6	8 *	АВТ	АВТ	3,7 **
М40-М	М40	5,5 *	Д16Т	АВТ	2,8 *
Д20М	Д20	5,2 *	В95Т	АК	1,3 **
АМцМ	АМц	4,3 *			

* Трещины в шве.
** Трещины в зоне термического влияния.

виваются большие деформации удлинения, способные вызвать горячие трещины. Если трещины не образуются даже при сварке низкокачественными электродными материалами с низким показателем $v_{кр}$, то это свидетельствует о том, что данный конструктивный узел слабо подвержен образованию в нем горячих трещин.

§ 7.2. ХОЛОДНЫЕ ТРЕЩИНЫ

Наиболее часто холодные трещины возникают в легированных сталях в тех случаях, когда металл под действием термического цикла сварки претерпевает закалку. В этих случаях холодные трещины при сварке появляются в результате замедленного разрушения свежезакаленной стали от действия остаточных сварочных напряжений. Холодные трещины в зависимости от состава и класса стали могут быть вызваны: а) мартенситным превращением аустенита у среднелегированных сталей мартенситного и перлитного классов; б) сегрегацией примесей на границах аустенитных зерен при повторном нагреве до 400. . .700 °С при сварке с насыщением водородом у низкоуглеродистых среднелегированных сталей бейнитного класса; в) выделением у высокохромистых ферритных сталей карбонитридных фаз по границам зерен; г) скоплением в зонах термического влияния перлитно-ферритных сталей неметаллических включений в элементах полосчатой микроструктуры стали ламелярные трещины в зоне термического влияния.

Исследованиями установлено, что холодные трещины имеют участок зарождения разрушения и участок распространения трещины. На участке зарождения, не превышающем размеры нескольких зерен, разрушение происходит по границам зерен.

Можно отметить несколько особенностей появления холодных трещин.

1. Холодные трещины появляются под действием постоянной или медленно меняющейся нагрузки при напряжениях существенно ниже (в 2. . .3 раза) уровня кратковременной прочности, найденной при обычном нагружении в испытательных машинах. Уровни напряжений, при которых появляются трещины, соизмеримы с остаточными напряжениями при сварке. Поэтому сварочные напряжения могут вызвать образование холодных трещин. Для появления разрушения необходимо некоторое время.

2. Наименьшая сопротивляемость возникновению холодных трещин обнаруживается непосредственно после сварки, а затем прочность постепенно растет и явления замедленного разрушения сильно ослабевают спустя некоторое время (2. . .25 суток).

3. Склонность к замедленному разрушению полностью подавляется при охлаждении металла до температур ниже —70 °С, но восстанавливается при нагреве до +20 °С; существенно ослабляется при нагреве до 100. . .150 °С и исчезает при нагреве до 200. . .300 °С.

Основными факторами, способствующими появлению холодных трещин, являются: 1) неблагоприятное структурное состояние металла, соответствующее высоким скоростям охлаждения стали, перегреву, старению; 2) присутствие растягивающих напряжений 1-го рода; 3) наличие водорода в металле сварного соединения.

Холодные трещины могут образовываться в шве, зоне термического влияния, если металл был нагрет до $T > A_{c_3}$, по линии сплавления; они могут располагаться как вдоль, так и поперек оси шва.

Методы оценки сопротивляемости металла образованию холодных трещин достаточно разнообразны. Для оценки свойств основного металла и его реакции на термический цикл сварки применяют малые образцы, прошедшие нагрев и охлаждение по циклу, близкому к сварочному. Испытания проводят на замедленное разрушение под постоянной нагрузкой, прикладываемой в течение 20. . .72 часов непосредственно после термического воздействия. Образцы растягивают или изгибают. Минималь-

ное разрушающее напряжение принимают за показатель сопротивляемости разрушению. Существуют разновидности такого испытания основного металла, отличающиеся максимальной температурой нагрева и последовательностью ступенчатого приложения нагрузки при различных температурах остывания для имитации действия сварочных напряжений. В качестве примера на рис. 7.5 приведены кривые зависимости минимальной прочности при изгибе



Рис. 7.5. Зависимость прочности σ при замедленном разрушении от максимальной температуры нагрева T

от максимальной температуры нагрева для двух марок сталей. Наименьшая прочность соответствует температуре нагрева, при которой начинается оплавление границ зерен.

Для оценки сопротивляемости сварных соединений образованию холодных трещин применяют сварочные технологические пробы и специальные машинные испытания. Существует много проб, отличающихся между собой по форме и размерам образцов, процедуре сварки и методам оценки стойкости. Например, крестовая проба (рис. 7.6) предусматривает сварку балки длиной 200. . .300 мм из металла толщиной s=10. . .30 мм и шириной листов $b\approx$ $\approx$150 мм, с катетом швов 8. .20 мм при различных начальных температурах образца —40. . .+250 °С в последовательности выполнения швов, показанной на рисунке их номерами. Через 4 суток из образца вырезают три поперечные темплета шириной 25 мм, и после травления выявляют имеющиеся трещины. Оценка сварных соединений проводится по протяженности трещин, их количеству, месту расположения в тех или иных швах и начальной температуре изделия, при которой трещины появляются.

В пробе ЦНИИТС используют листы с толщиной, соответствующей применяемой в конструкции, и размером 1000×2000 мм для сварки стыкового шва длиной 2000 мм.

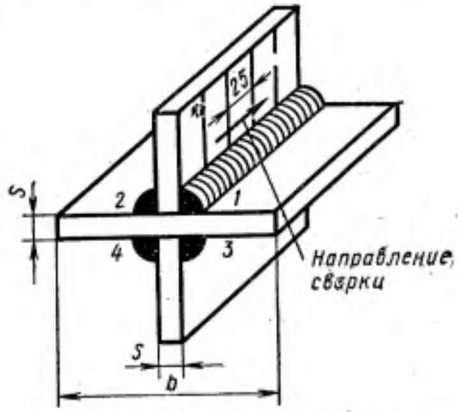


Рис. 7.6. Образец крестовой пробы

Листы перед сваркой собирают на поперечных, приваренных к листам с одной стороны через 400 мм ребрах высотой 250 мм. Сварку ведут при различных начальных температурах. Через сутки после сварки образец простукивают массивным молотком для раскрытия образовавшихся холодных трещин. Затем делают продольные и поперечные шлифы для выявления трещин. С помощью пробы определяют условия сварки, при которых соединения являются стойкими против образования трещин.

Машинные методы испытаний предусматривают сварку и последующее нагружение образцов относительно небольших размеров. Размеры их должны быть такими, чтобы при сварке воспроизводились термические, деформационные и металлургические процессы, характерные для условий сварки элементов конструкций. Нагрузка создается испытательной машиной после сварки при температуре 50 °С. Схема нагружения зависит от толщины металла и вида сварного соединения. Для толщины металла 1. . .3 мм и стыкового соединения используется плоский круглый или восьмиугольный образец, заделан-

ный по контуру диаметром 100 мм и нагруженный односторонней изгибающей нагрузкой. При толщине 3. . .6 мм используют образцы стыковых соединений (рис. 7.7, *а*); при толщине больше 6 мм — образцы тавровых соединений (рис. 7.7, *б*, *в*) и схему консольного изгиба. При консольном изгибе стыкового образца плечо изгиба L_1 расположено перпендикулярно продольной оси шва, чтобы по всей длине шва были одинаковые изгибающие напряжения. Тавровые соединения нагружаются по схеме рис. 7.7, *б*

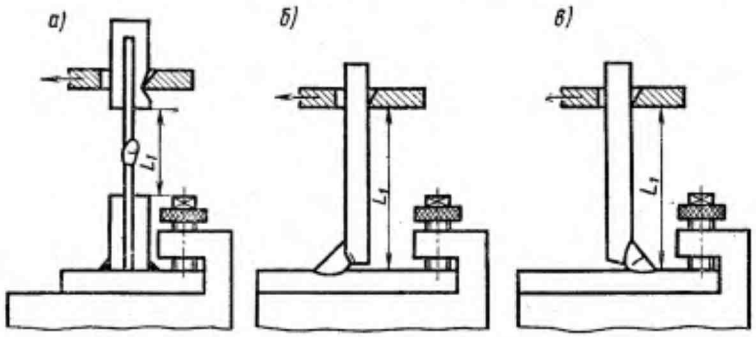


Рис. 7.7. Схема закрепления и нагружения при испытании стыковых (*а*) и тавровых (*б*, *в*) образцов

для испытания зон термического влияния по схеме рис. 7.7, *в* для испытания металла шва. Для локализации разрушения в вертикальной стенке полку делают из малоуглеродистой стали, не склонной к образованию холодных трещин.

Таблица 7.2

Минимальные разрушающие напряжения в швах, полученных аргонодуговым переплавом основного металла, МПа

Материал	Растяжение поперек шва	Растяжение вдоль шва	Консольный изгиб поперек шва	Консольный изгиб вдоль шва	Двухосный изгиб при плоском напряженном состоянии
4Х13	175	200	175	200	—
2Х13	350	400	200	230	410
42Х2ГСНМА	260	320	175	200	—
30Х2ГСНВМА	330	400	—	—	—
43Х3СНМВФА	150	450	155	300	100
33Х3СНМВФА	350	510	—	—	350
28Х3СНМВФА	400	600	300	350	—

За количественный показатель сопротивляемости образованию холодных трещин принимают минимальное напряжение от внешней нагрузки, вызывающее разрушение образцов или образование в них трещин. На рис. 7.8 представлены результаты испытаний сварных соединений стали 30ХН2МФА. Линией *1* показана зависимость времени до разрушения образца от уровня напряжения, приложенного непосредственно после сварки. Приложение нагрузки

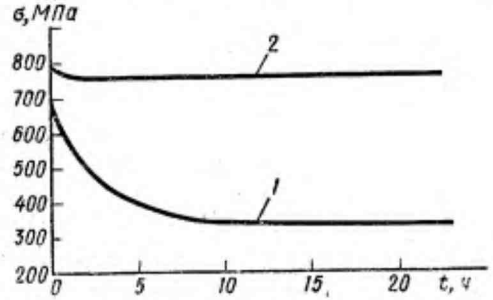


Рис. 7.8. Результаты испытания образцов тавровых соединений из стали 30ХН2МФА

после 6 суток выдержки не дает снижения уровня разрушающих напряжений (линия *2*).

В табл. 7.2 и 7.3 приведены уровни разрушающих напряжений, которые в ряде случаев существенно ниже временного сопротивления, найденного в условиях кратковременного нагружения. Видно, что разрушающие напряжения тем выше, чем меньше содержание углерода в стали; растяжение или изгиб поперек шва более опасны, чем вдоль шва.

Холодные трещины образуются не только в легированных сталях, но и в сплавах других металлов [2].

Таблица 7.3

Минимальные разрушающие напряжения в зоне термического влияния сварных швов, полученных после аргонодугового переплава проволоки Св-08, МПа

Материал	Растяжение поперек шва	Растяжение вдоль шва
2Х13	530	660
42Х2ГСНМА	310	630
43Х3СНМВФА	430	555

§ 7.3. ПОВЫШЕНИЕ СОПРОТИВЛЯЕМОСТИ ОБРАЗОВАНИЮ ГОРЯЧИХ И ХОЛОДНЫХ ТРЕЩИН

Различные металлы по-разному сопротивляются образованию горячих и холодных трещин, и чаще всего основное внимание приходится уделять какому-нибудь одному виду. Многие металлы вообще не требуют специальных мер борьбы с трещинами при соблюдении обычных мер подготовки основного металла и сварочных материалов перед сваркой, соблюдении рациональных режимов и т. п. Решающее значение для борьбы с горячими трещинами в швах имеет выбор присадочного металла. Основной металл также может быть улучшен без существенного изменения своего состава путем улучшения технологии его производства. Основная цель — повысить пластичность металла в температурном интервале хрупкости и уменьшить этот интервал.

Существуют приемы, с помощью которых воздействуют на уменьшение деформаций металла, протекающих в высокотемпературной области. Так, для стыковых соединений листов принимают меры по уменьшению поперечных деформаций удлинения, создавая закрепление на начальном и конечном участках шва. Необходимо иметь в виду, что при пересечении швом участков, в которых есть растягивающие напряжения, могут возникнуть повышенные деформации удлинения, например при пересечении шва с неснятыми сварочными напряжениями или при переварке прихватки, в которой возникли большие растягивающие усилия в процессе сварки. Для устранения этих недостатков применяют предварительное перерезание этого участка (если позволяет конструкция), его подогрев непосредственно перед сваркой или изменение конструктивных решений. Следует избегать также концентраторов в зоне кристаллизующегося металла, например стыковых швов с непроваром, замковых соединений, сварки на остающейся подкладке.

Для борьбы с горячими и холодными трещинами кроме рационального выбора основного металла и присадочных материалов существенное значение имеет регулирование термического цикла в процессе сварки. Для предотвращения образования холодных трещин важна также послесварочная обработка сварных соединений, в частности термическая. Чем выше содержание углерода, тем ниже сопротивляемость образованию холодных трещин. В низколегированных сталях с углеродом ниже 0,1. . .0,12% при уменьшенном содержании водорода холодные трещины практически не встречаются. Легирование стали ванадием, молибденом, титаном повышает сопротивляемость. Предварительная термическая обработка — отжиг для укрупнения карбидов, изотермическая закалка с высоким отпуском и термомеханическая обработка — также повышает сопротивляемость сталей образованию холодных трещин. В отношении химического состава металла шва сохраняются те же рекомендации, что и для основного металла. Если швы могут быть выполнены из менее склонных к трещинам, чем основной металл, материалов, этим следует пользоваться.

Сварку некоторых высокопрочных сталей проводят аустенитными электродами, которые уменьшают перегрев зоны термического влияния и снижают в ней концентрацию диффузионного водорода. Прокалка электродов и флюсов, осушение защитных газов, предупреждение попадания влаги в зону сварки способствуют уменьшению количества водорода в шве и повышают сопротивляемость холодным трещинам.

Увеличение погонной энергии сварки уменьшает скорость охлаждения и в ряде случаев, например для низколегированных сталей, благоприятно для повышения сопротивляемости холодным трещинам. Ограничением в данном случае является чрезмерное увеличение зерна от перегрева, особенно для некоторых среднелегированных сталей. То же относится и к предварительному подогреву. Более рационально проводить сопутствующий подогрев или вести многоваликовую сварку таким образом, чтобы не вызывать образование мартенсита.

Эффективным средством борьбы с холодными трещинами является отпуск сразу после сварки до начала их образования. Отпуск в данном случае изменяет структурное состояние металла и вызывает релаксацию напряжений I рода.

Контрольные вопросы к главе 7

1. Какие основные факторы влияют на образование горячих (кристаллизационных) трещин?
2. Какие приемы оценки сопротивляемости сварных соединений образованию горячих трещин вам известны?
3. При каких условиях могут образоваться холодные трещины при сварке закаливающихся сталей?
4. Назовите методы, с помощью которых можно оценить сопротивляемость стали образованию холодных трещин.
5. В чем состоят приемы повышения сопротивляемости сварных соединений образованию трещин (горячих, холодных)?

ГЛАВА 8

СВЕДЕНИЯ ИЗ СТРОИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКИ

§ 8.1. ПОНЯТИЕ О ФЕРМАХ

Шарнирной фермой называется геометрически неизменяемая система стержней, связанных между собой по концам шарнирами. Система неизменяема, если под действием внешних сил, приложенных к ней, перемещения ее точек происходят лишь вследствие упругих деформаций.

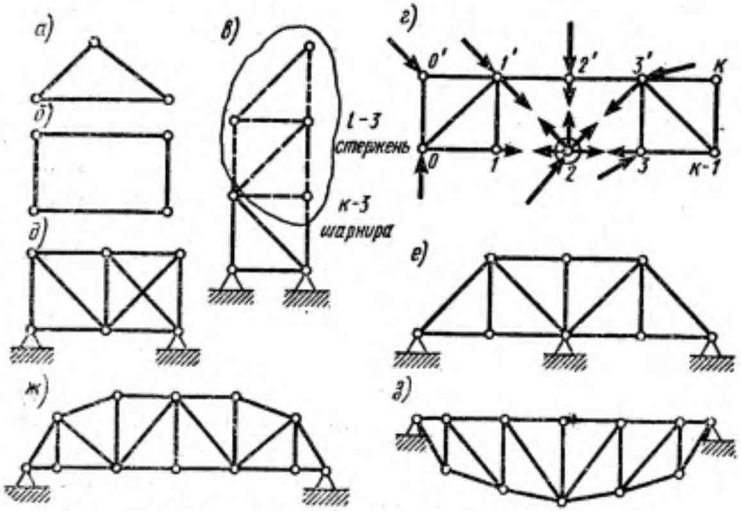


Рис. 8.1. Примеры шарнирных стержневых систем:
а — ферма из трех стержней; *б* — механизм; *в* — построение ферм добавлением к основному треугольнику пар стержней с шарниром; *г* — к определению усилий в стержнях; *д*, *е* — примеры статически неопределимых ферм; *ж* — ферма с полигональным верхним поясом и треугольной решеткой; *з* — ферма с полигональным нижним поясом и раскосной решеткой

Три стержня, соединенные между собой шарнирно, как показано на рис. 8.1, *а*, представляют собой неизменяемую плоскую ферму.

Четыре стержня, соединенные, как показано на рис. 8.1, *б*, представляют собой *механизм*.

Фермы со сварными соединениями не представляют собой шарнирных систем. Однако экспериментальные исследования показывают, что распределения усилий в фермах со сварными соединениями мало отличаются от распределения усилий в фермах, составленных из стержней, соединенных болтами — шарнирами. Поэтому сварные фермы условно рассматриваются как шарнирные системы.

Точки соединений стержней называются *узлами фермы*. Стержни обозначаются узлами, между которыми они заключены.

Из основного треугольника можно получить новые неизменяемые системы ферм последовательным добавлением двух стержней с шарниром. Образование ферм таким образом показано на рис. 8.1, *в*.

Фермы со структурой, полученной последовательным добавлением к основному треугольнику по два стержня с шарниром, называются *простейшими*.

§ 8.2. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ НЕИЗМЕНЯЕМОСТЬ И СТАТИЧЕСКАЯ ОПРЕДЕЛИМОСТЬ ФЕРМ

Допустим, что простейшая ферма имеет закрепления, свойственные статически определимым системам, например одну неподвижную, а другую подвижную опоры. Определим в этой ферме соотношение между количеством стержней и шарниров (рис. 8.1, *в*).

Обозначим число стержней фермы через i (кроме стержней, входящих в состав опорных закреплений), а число шарниров — через k.

На образование основной треугольной фермы требуются три стержня и три шарнира. Таким образом, количество стержней, не входящих в состав основного треугольника, составляет $(i-3)$, а количество шарниров, не входящих в состав этого треугольника, — $(k-3)$.

Так как образование ферм производится из основного треугольника последовательным добавлением двух стержней и одного шарнира, то

$$i-3=2(k-3),$$

откуда

$$i=2k-3. \qquad (8.1)$$

Это является необходимым условием геометрически неизменяемой системы. Для простейших ферм оно является не только необходимым, но и достаточным. Достаточным оно является и для некоторых других типов ферм.

Класс статически определимых ферм, применяемых в практике, очень широк. Найдем условия статической определимости ферм.

Будем полагать, что фермы загружены лишь в узлах. При этом в элементах, имеющих шарнирные закрепления по концам, отсутствуют изгибающие моменты и поперечные силы. Единственным расчетным усилием в каждом стержне является продольная сила. Поэтому система, имеющая i стержней, обладает таким же числом неизвестных усилий.

Для каждого узла фермы могут быть написаны два условия равновесия для определения неизвестных усилий в стержнях $\sum X=0$, $\sum Y=0$.

Если число узлов фермы равно k, то число уравнений равновесия равно $2k$ (рис. 8.1, *в*).

Из указанных $2k$ уравнений должны быть определены все неизвестные усилия в стержнях, а также неизвестные реакции, приложенные в опорах.

Предположим, что ферма имеет опорные стержни, реакции которых находятся из уравнений статики. При этом три уравнения должны быть использованы для нахождения неизвестных реактивных сил.

Фермы такого рода статически определимы, если количество их стержней равно $(2k—3)$. Таким образом, необходимые условия геометрической неизменяемости совпадают с условием статической определимости ферм, имеющих три стержня в опорных закреплениях (одна опора — шарнирно-неподвижная с двумя стержнями и другая — шарнирно-подвижная с одним стержнем).

Однако возможны случаи, когда в части системы находится «лишний» с позиции неизменяемости стержень. При этом система в целом, несмотря на соблюдение условия $(2k—3)$, оказывается системой изменяемой.

Если количество стержней фермы i превышает $(2k—3)$, то усилия во всех стержнях фермы не могут быть определены при помощи уравнений статики. В этом случае необходимо использовать уравнения упругих деформаций.

Системы ферм, изображенные на рис. 8.1, *г*, *ж*, *з*, статически определимы; на рис. 8.1, *д* — система статически неопределима, так как число стержней превышает $(2k—3)$. Ферма, изображенная на рис. 8.1, *е*, также статически неопределима, так как она имеет одно лишнее закрепление в опоре.

§ 8.3. КЛАССИФИКАЦИЯ ФЕРМ

Фермы имеют верхний и нижний пояса, которые соединяются между собой решеткой. Вертикальные элементы решетки называют *стойками*; наклонные — *раскосами*.

Узлы нижнего пояса нумеруют 0, 1, 2 . . .; верхнего — 0, 1′, 2′ . . . . Стержни и усилия, возникающие в них, обозначают цифрами, определяющими рассматриваемый элемент.

Стержни *0′1′*, *1′2′*, *2′3′* и т. д. составляют элементы верхнего пояса фермы (рис. 8.1, *г*).

Стержни *01*, *12*, *23* — элементы нижнего пояса (панели).

Стержни *11′*, *22′*, *33′* и т. д.— стойки.

Стержни *01′*, *1′2*, *23′* и т. д.— раскосы.

Пример ферм с параллельными поясами изображен на рис. 8.1, *г*; с полигональным верхним поясом — на рис. 8.1, *ж*; с полигональным нижним поясом — на рис. 8.1, *з*. Решетка ферм, изображенная на рис. 8.1, *ж*, называется *треугольной*, а на рис. 8.1, *з* — *раскосной*.

В зависимости от назначений фермы называются *стропильными*, поддерживающими кровлю зданий, *мостовыми*, *крановыми*, *вагонными* и т. п.

§ 8.4. СОЕДИНЕНИЯ ФЕРМ В ГЕОМЕТРИЧЕСКИ ПРОСТРАНСТВЕННУЮ НЕИЗМЕНЯЕМУЮ СИСТЕМУ

Инженерное сооружение очень редко состоит из одной фермы, чаще применяют парные фермы, например, в кранах, вагонах, железнодорожных мостах, а во многих случаях ставят ряд ферм. При перекрытии проемов зданий фермы соединяют между собой стержнями, которые составляют связи. Связи, расположенные в плоскостях поясов, называют *продольными*, в плоскостях решетки — *поперечными*.

В своей совокупности плоские фермы со связями образуют пространственную геометрически неизменяемую систему, которая может быть статически определимой или при наличии избыточного количества стержней статически неопределимой.

§ 8.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ СТЕРЖНЕЙ ФЕРМЫ АНАЛИТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Усилия стержней фермы определяются по правилу РОЗУ: разрез фермы; отбрасывание одной части; замена стержней силами; условия равновесия отрезанной части.

Разрезы производят методами вырезания узла и рассечения фермы. В месте разреза к стержням прикладывают неизвестные силы и направляют стрелки от сечений. Растягивающие усилия считают положительными. Допустим,

что после решения уравнений статики искомое неизвестное усилие имеет отрицательный знак. Это указывает на то, что знак усилия первоначально был выбран неправильно. Стержень оказывается не растянутым, а сжатым.

Определение усилий в стержнях ферм методом вырезания узлов удобно в следующих случаях: 1) в узле сходятся два стержня (рис. 8.2, *а*), при этом усилия находят из уравнений $\sum X=0$, $\sum Y=0$; 2) в узле сходятся три стержня, два из них являются продолжением один другого (рис. 8.2, *б*), усилие в третьем стержне определяют проектированием всех сил на направление, перпендикулярное *x*; 3) в узле сходятся несколько стержней, при этом все усилия, кроме двух, уже найдены какими-либо другими приемами.

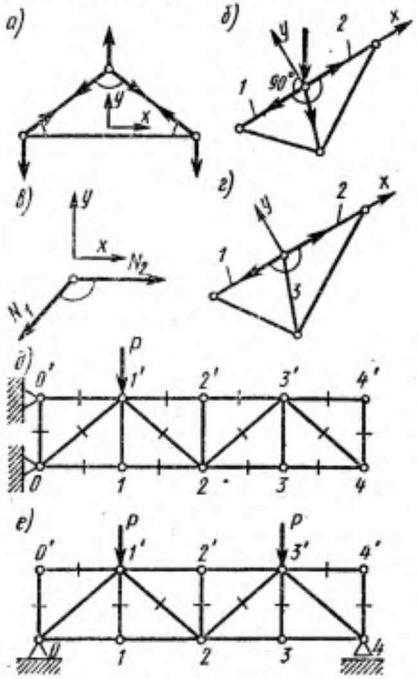


Рис. 8.2. К определению усилий в стержнях фермы методом вырезания углов (перечеркнутые стержни не испытывают усилий)

Если в узле сходятся два стержня и отсутствуют внешние нагрузки, то усилия в обоих стержнях равны нулю. Спроецируем все силы на вертикаль $\sum Y=0$, откуда $N_1=0$ (рис. 8.2, *в*), из условия $\sum X=0$ следует, что $N_2=0$.

Если в узле сходятся три стержня при условии, что два являются продолжением один другого (рис. 8.2, *г*) и в узле отсутствует внешняя нагрузка, то усилие в третьем стержне равно 0. Проецируем силы на направление *y*, перпендикулярное стержням *1* и *2*,

$$\sum Y=0. \qquad (8.2)$$

Убеждаемся в правильности того, что продольное усилие в третьем стержне $N_3=0$.

Легко показать, что в системе, изображенной на рис. 8.2, *д*, усилия во всех стержнях, кроме *0'1'* и *01'*, равны нулю, рассмотрите равновесие узлов *4'*, *4*, *3*, *3'* и т. д., а в системе на рис. 8.2, *е* усилия в стержнях *00'*, *11'*, *22'*, *33'*, *44'*, *0'1'*, *3'4'*, *1'2*, *23'* равны нулю при заданных условиях нагружения.

При определении усилий в стержнях фермы методом ее рассечения (рис. 8.3, *а*) необходимо составить уравнения равновесия в виде

$$\sum M_1=0; \quad \sum M_2=0; \quad \sum M_g=0, \qquad (8.3)$$

где *1'*, *2* и *g* — моментные точки.

Точки называют *моментными*, если они определяются пересечением двух из перерезанных стержней фермы.

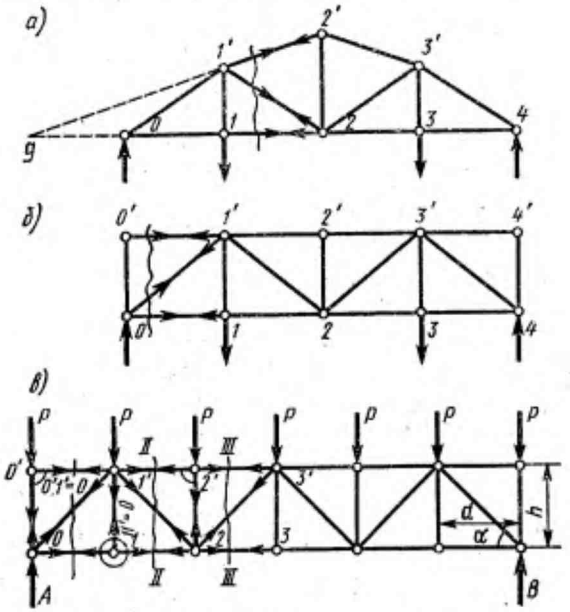


Рис. 8.3. К определению усилий в стержнях методом рассечения ферм:

а — ферма с непараллельными поясами; *б*, *в* — фермы с параллельными поясами

Моментная точка *1'* лежит на пересечении стержней *1'2'* и *1'2*; точка *2* — на пересечении *1'2* и *12*; точка *g* — на пересечении *12* и *1'2'*.

Если рассматриваемые разрезанные стержни параллельны, например стержень *01* и *0'1'* (рис. 8.3, *б*), то моментная точка *g* перемещается в бесконечность. При этом

статические уравнения равновесия следует написать в форме

$$\sum M_0 = 0; \quad \sum M_1 = 0; \quad \sum Y = 0. \tag{8.4}$$

Каждое уравнение содержит одно неизвестное, так как остальные неизвестные усилия образуют относительно моментной точки моменты, равные нулю.

Определим усилия в стержнях фермы (рис. 8.3, *в*) с параллельными поясами.

Вследствие симметрии фермы и нагрузки опорные реакции равны между собой:

$$A = B = 3{,}5P.$$

Разрезаем третью панель фермы (разрез *III—III*).

Пишем условие равновесия отрезанной левой части фермы, нагруженной реакцией A, силами P и усилиями стержней $2'3'$, 23 и $23'$ в виде $\sum M_{3'}=0$:

$$3{,}5P \cdot 3d - P3d - P2d - Pd - 23h = 0, \tag{8.5}$$

откуда

$$23 = \frac{M_{3'}}{h} = 4{,}5\,\frac{Pd}{h}, \tag{8.6}$$

где $M_{x'}$ — момент сил, расположенных слева от разреза, относительно точки $3'$ при учете фермы как сплошной балочной системы.

Напишем условие $\sum M_2=0$:

$$3{,}5P2d - P2d - Pd + 2'3'h = 0; \tag{8.7}$$

$$2'3' = -\frac{M_2}{h} = -4\,\frac{Pd}{h}, \tag{8.8}$$

где M_2 — момент сил, находящихся слева от разреза относительно точки 2.

Напишем условие $\sum Y=0$:

$$3{,}5P - P - P - P + 23' \sin\alpha = 0; \tag{8.9}$$

$$23' = \frac{Q_{III}}{\sin\alpha} = 0{,}5\,\frac{P}{\sin\alpha}, \tag{8.10}$$

где Q_{III} — поперечная сила от сил, расположенных слева от разреза при рассмотрении фермы как сплошной балочной системы.

Производим подобные разрезы по второй и первой панелям.

Подобным же образом находим усилия в остальных стержнях поясов и раскосов.

Усилия в стойках находим методом вырезания узлов. Вырезаем узел $0'$. Тогда

$$\sum Y = -0'0 - P = 0, \tag{8.11}$$

откуда

$$0'0 = -P. \tag{8.12}$$

Вырезаем узел 1. В этом узле нет сил, поэтому из условия $\sum Y=0$ находим $11'=0$.

Вырезаем узел $2'$. При этом имеем

$$\sum Y = -22' - P = 0, \tag{8.13}$$

откуда

$$22' = -P. \tag{8.14}$$

Легко показать, что распределение усилий в стержнях поясов сквозных ферм с параллельными поясами подобно распределению изгибающих моментов в балочных сплошных конструкциях. Нижние пояса растянуты, верхние сжаты при нагрузках, изображенных на рис. 8.3, *в*. Усилия в стержнях поясов возрастают от опор к середине пролета.

Распределение усилий в раскосах сквозных ферм с параллельными поясами подобно распределению поперечной силы в балочной сплошной конструкции. Усилия в раскосах имеют наименьшую величину в середине пролета. Усилия возрастают от середины пролета фермы к ее опорам.

§ 8.6. ДЕФОРМАЦИИ ФЕРМ

В результате продольных деформаций стержней узлы фермы испытывают перемещения в плоскости. Например, стержень *1* под действием силы P удлиняется на δl_1, стержень *2* укорачивается на δl_2 (рис. 8.4, *а*). В результате изменения длин и поворотов стержней *1* и *2* точка O переместится в точку O'. Также перемещаются при удлинении стержней узлы фермы. Вертикальные составляющие перемещения узлов называют прогибами фермы. Часто в практике расчета определяют только прогибы узлов. Иногда вычисляют вертикальные $f_в$ и горизонтальные $f_г$ составляющие, а затем находят полные перемещения f по формуле

$$f = \sqrt{f_в^2 + f_г^2}. \tag{8.15}$$

Перемещения узлов фермы от вертикальных нагрузок определяют по формуле Мора:

$$f=\sum\frac{N\cdot N_1 l_i}{EA}, \qquad (8.16)$$

где N — усилие в стержнях фермы от заданной нагрузки; N_1 — усилие в стержнях от единичной силы, приложенной

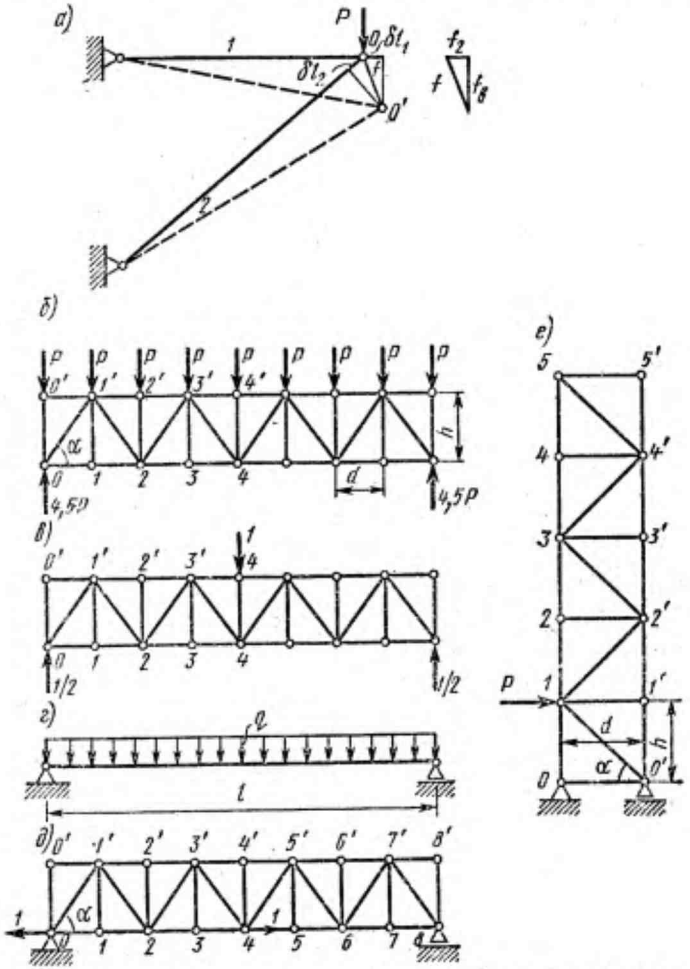


Рис. 8.4. Определение перемещений узлов ферм под нагрузкой: *а* — перемещение узла O в плоскости; *б* — к определению усилий в стержнях фермы от нагрузки P; *в* — от единичной силы в узле $4'$; *г* — q в эквивалентной балке; *д* — от горизонтальной единичной силы в узле 4; *е* — к определению усилий в вертикальной ферме

в узле, в котором определяется перемещение по направлению искомого перемещения; l_i — длина i-го стержня; A — площадь его поперечного сечения; E — модуль упругости.

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

Пример 1. Рассмотрим пример определения вертикального перемещения (прогиба) среднего узла фермы, изображенного на рис. 8.4, *б*. Примем, что площади сечений элементов поясов одинаковы и равны $A_п$; площади сечений раскосов и стоек также одинаковы и равны $A_р$. Расчет удобно расположить в форме табл. 8.1. Так как система и нагрузка в ней симметричны, усилия следует вычислять лишь для одной половины фермы.

На рис. 8.4, *в* изображена та же ферма под действием единичной силы, приложенной в среднем узле вертикально. Пользуясь методом РОЗУ, вычисляем усилия N в стержнях фермы от сил P, усилия N_1 в аналогичных стержнях от силы, равной единице. Реакция от нагрузок $A=B=4{,}5\,P$; реакция от единичной силы: $A=B=0{,}5$

$$\sum\frac{NN_1l_i}{EA}=\frac{54Pd^3}{h^2EA_п}+\frac{4{,}5Ph}{EA_р\sin^3\alpha}. \qquad (8.17)$$

Вертикальное перемещение среднего узла фермы равно удвоенному значению суммы, определенной с учетом деформаций одной половины фермы. Таким образом,

$$f=\frac{108Pd^3}{h^2EA_п}+\frac{9Ph}{EA_р\sin^3\alpha}. \qquad (8.18)$$

Первый член суммы — это величина прогиба, определяемого деформациями поясов, а второй член — величина прогиба, определяемого деформацией решетки. Как видно из приведенного соотношения (8.18), деформации фермы зависят в очень большой степени от площадей сечений поясов и решетки.

Допустим, что (в частном случае) все площади сечений элементов равны между собой $A_п=A_р=A$, тогда

$$f=\left(\frac{108Pd^3}{h^2}+\frac{9Ph}{\sin^3\alpha}\right)\frac{1}{EA}. \qquad (8.19)$$

Очевидно, что влияние деформации поясов на прогиб в этом случае более значительно, нежели влияние деформации решетки.

Обозначив $\frac{P}{d}=q$ и подставив в формулу (8.19), получим

$$f=\left(\frac{108qd^4}{h^2}+\frac{9Ph}{\sin^3\alpha}\right)\frac{1}{EA}.$$

Приближенно примем, что $2A_п\left(\frac{h}{2}\right)^2=J$, т. е. моменту инерции поперечного сечения фермы, и $d=l/8$, тогда

$$f=\frac{108ql^4}{8096EJ}+\frac{9qdh}{\sin^3\alpha EA}=\frac{1}{75}\frac{ql^4}{EJ}+\frac{9qdh}{\sin^3\alpha EA}. \qquad (8.20)$$

Таблица 8.1

Определение вертикального перемещения

Элемент	Усилие N	Усилие N_1	Длина l_i	$\frac{NN_1}{l_i}$	Примечание
01	$3{,}5Pd/h$	$0{,}5d/h$		$1{,}75\frac{Pd^3}{h^2}$	Длина средней стойки при суммировании деформаций элементов одной половины фермы принимается равной $0{,}5h$
12	$3{,}5Pd/h$	$0{,}5d/h$		$1{,}75\frac{Pd^3}{h^2}$	
23	$7{,}5Pd/h$	$1{,}5d/h$		$11{,}25\frac{Pd^3}{h^2}$	
34	$7{,}5Pd/h$	$1{,}5d/h$	d	$11{,}25\frac{Pd^3}{h^2}$	
0'1'	0	0		0	
1'2'	$-6Pd/h$	$-1d/h$		$6\frac{Pd^3}{h^2}$	
2'3'	$-6Pd/h$	$-1d/h$		$6\frac{Pd^3}{h^2}$	
3'4'	$-8Pd/h$	$-2d/h$		$16\frac{Pd^3}{h^2}$	
01'	$-3{,}5P/\sin\alpha$	$-0{,}5\ 1/\sin\alpha$		$1{,}75\frac{Ph}{\sin^3\alpha}$	
1'2	$+2{,}5P/\sin\alpha$	$+0{,}5\ 1/\sin\alpha$		$1{,}25\frac{Ph}{\sin^3\alpha}$	
23'	$-1{,}5P/\sin\alpha$	$-0{,}5\ 1/\sin\alpha$	$\frac{h}{\sin\alpha}$	$0{,}75\frac{Ph}{\sin^3\alpha}$	
3'4	$+0{,}5P/\sin\alpha$	$+0{,}5\ 1/\sin\alpha$		$0{,}25\frac{Ph}{\sin^3\alpha}$	
00'	$-P$	0		0	
11'	0	0	h	0	
22'	$-P$	0		0	
33'	0	0		0	
44'	$-P$	-1	$h/2$	$0{,}5Ph$	

Интересно отметить, что прогиб сплошной балки (рис. 8.4, *е*) от равномерно распределенной нагрузки составляет

$$f=\frac{5}{384}\frac{ql^4}{EJ}=\frac{1}{77}\frac{ql^4}{EJ}.$$

Таким образом, вертикальная составляющая прогиба фермы от сил P, вызванная деформациями поясов, близка по величине прогибу от равномерно распределенной нагрузки q в балке сплошного сечения.

Если принять $\alpha=45°$, т. е. $h=d$ и $\sin\alpha=0{,}7$, то соотношение (8.19) примет вид

$$f=(108Pd+23Pd)\frac{1}{EA}. \tag{8.21}$$

Таким образом, деформация решетки увеличивает прогиб, вызванный деформацией поясов, на 20%. Эта цифра верна в предположении, что $A_п=A_р$, если $A_п<A_р$, что часто бывает, то величина деформации раскосов на прогиб оказывается более значительной.

Пример 2. Рассмотрим в качестве примера определение вертикального перемещения среднего узла фермы *4'*, изображенного на рис. 8.4, *д*, в результате повышения температуры стержней нижнего пояса на t. Коэффициент температурного расширения металла α известен.

В формуле (8.16)

$$f=\sum\frac{NN_1l_i}{EA} \tag{8.22}$$

величина $\frac{Nl_i}{EA}$ представляет собой деформацию стержня; в данном случае она вызвана его нагревом. Обозначим ее δl_t.

Температурные удлинения стержня

$$\delta l_t=\alpha t l_i. \tag{8.23}$$

Поэтому формула (8.16) примет вид

$$f=\sum\alpha t l_i N_1. \tag{8.24}$$

Ответ: $f=8\alpha td^2/h$ (8.25)

Пример 3. Определим горизонтальное перемещение точки *5'* вертикальной фермы от силы P, приложенной в узле *1* (рис. 8.4, *е*) $EA=\text{const}$.

Следует обратить внимание, что усилия N от силы P во всех элементах, кроме *01* и *0'1*, равны 0.

Ответ: $\frac{P}{EA}\left(5h\,\text{tg}^2\alpha+\frac{d}{\cos^3\alpha}\right)$. (8.26)

§ 8.7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ УСИЛИЙ В БАЛКАХ МЕТОДОМ ЛИНИЙ ВЛИЯНИЯ

Расчетные усилия в балках часто удобно определять методом линий влияния. Этот метод особенно целесообразен при нахождении усилий в балках от движущихся систем грузов, которые могут занимать различные положения на изучаемой конструкции, например от веса тележек, перемещающихся по балкам крана.

Метод линий влияния принят при расчете не только балок, но и ферм, рамных конструкций и особенно при

расчете мостов крановых и других инженерных сооружений.

Линия влияния выражает зависимость усилия (или деформации) в каком-либо заданном сечении балки или элементе фермы от положения груза в них. Линии влияния в практических расчетах всегда строят от одного груза,

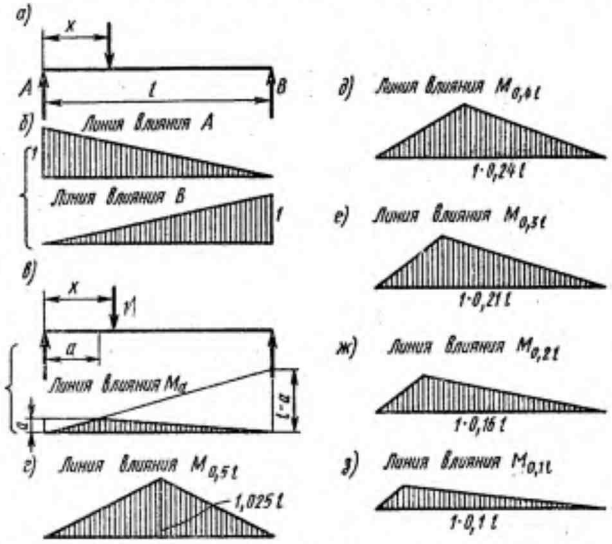


Рис. 8.5. К построению линий влияния опорных реакций и M в разных сечениях балки

равного единице, и после этого построения ее используют для определения усилий (или деформаций) в изучаемом сечении или элементе при любом заданном загружении от нескольких сосредоточенных сил или распределенных нагрузок.

Линии влияния опорной реакции в однопролетной балке с шарнирными опорами. Линия влияния опорной реакции балки выражает зависимость величины реакции от положения груза, равного единице, на балке.

Обозначим расстояние груза до левой опоры через x, пролет балки через l (рис. 8.5, *а*).

Реакция $A = 1\frac{l-x}{l}$.

Реакция A определяется уравнением наклонной прямой (рис. 8.5, *б*):

при $x=0$ $A=1$;

при $x=l$ $A=0$.

Подобным же образом строится линия влияния реакции B (рис. 8.5, *б*).

Линия влияния изгибающего момента M выражает зависимость величины момента в заданном сечении от положения груза, равного единице, на балке.

Допустим, что груз находится справа от сечения. При этом изгибающий момент

$$M_a = Aa = 1\frac{l-x}{l}a.$$

Построим линию влияния момента M (рис. 8.5, *в*) из условия, что: при $x=0$ $M_a=1a$; $x=l$ $M_a=0$.

Так как было сделано предположение, что груз находится справа от сечения a, то построенная прямая верна лишь на участке $l-a$.

Допустим, что груз находится слева от сечения a.

Изгибающий момент целесообразно выразить в этом случае через величину правой опорной реакции:

$$M_a = B(l-a) = 1\frac{x}{l}(l-a).$$

При $x=0$ $M_a=0$;
при $x=l$ $M_a=l-a$.

Так как было предположено, что груз находится слева от a, то построенная прямая верна лишь на участке $l-a$.

Линия влияния M_a имеет форму треугольника, заштрихованного на рис. 8.5, *в*, с вершиной в сечении a.

Если линия влияния строится для сечения $l/2$, то вертикальные отрезки, откладываемые на опорах, равны между собой и равны $1\frac{l}{2}$. Высота треугольника в этом случае равна $1\frac{l}{4}$ (рис. 8.5, *г*).

Подобным образом линии влияния M строятся для разных сечений балки, например $0{,}4l$, $0{,}3l$, $0{,}2l$, $0{,}1l$ (рис. 8.5, *д*. . .*з*). Ординаты линий влияния M имеют размерность длины. Высоты треугольников равны $1\cdot 0{,}25l$; $1\cdot 0{,}24l$ и т. д.

Линии влияния поперечной силы Q. Линии влияния поперечной силы Q выражают зависимость величины поперечной силы в заданном сечении a от положения груза, равного единице, на балке.

Допустим, что груз находится справа от сечения a:

$$Q_a = A = 1\frac{l-x}{l}.$$

Построим эту линию из условия (рис. 8.6, *а*), что
при $x=0$ $Q_a=1$;
при $x=l$ $Q_a=0$.
Прямая верна на участке $l-a$.

Допустим, что груз находится слева от сечения a. При этом

$$Q_a=-B=-1\frac{x}{l}$$

при $x=0$ $Q_a=0$;
при $x=l$ $Q_a=-1$.

Эта линия верна на участке $a-l$, под исследуемым сечением она меняет знак.

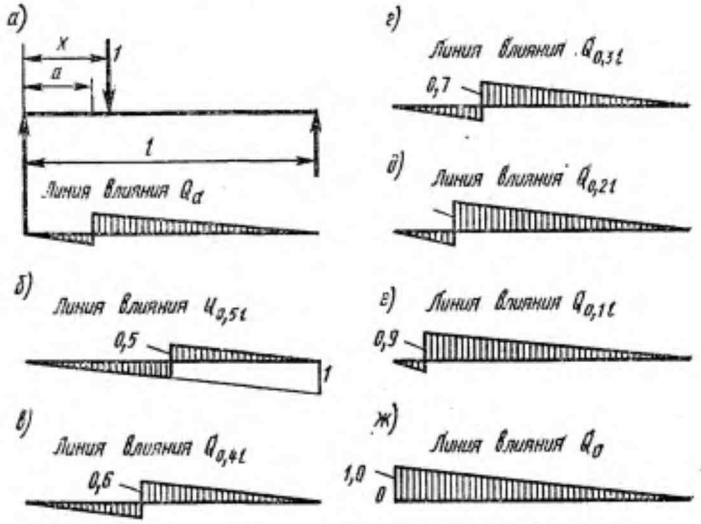


Рис. 8.6. К построению линии влияния Q в балке

Линии влияния Q для сечений балки $0{,}5l$, $0{,}4l$, $0{,}3l$, $0{,}2l$, $0{,}1l$ и опорные показаны на рис. 8.6, *а*. . .*ж*. Ординаты линий влияния Q безразмерны.

Рассмотрим, как строятся линии влияния M и Q для балки, защемленной в стену (рис. 8.7, *а*. . .*г*).

В сечении на свободном конце M_l и Q_l всегда равны нулю, в каком бы месте ни находилась единичная сила на балке. Поэтому линии влияния для этого сечения являются нулевыми (рис. 8.7, *а*). В сечении по опоре $M_0=-1\cdot x$, т. е. линия влияния имеет вид наклонной прямой. При $x=0$, т. е. когда сила находится в опорном сечении, $M_0=0$

при $x=l$ (груз на конце консоли), $M=-1l$ (рис. 8.7, *б*). Поперечная сила в опорном сечении $Q_0=-1$ в каком бы сечении балки ни находился груз (рис. 8.7, *в*).

Задание 1. Построить линии влияния $M_{l/2}$ и $Q_{l/2}$ для середины пролета балки, защемленной в стену (рис. 8.7, *а*).

Задание 2. Построить линии влияния $M_{l/2}$ и $Q_{l/2}$ для середины пролета консольной балки, у которой расстояние между опорами l, а длина консоли равна $l/4$ (рис. 8.7, *г*).

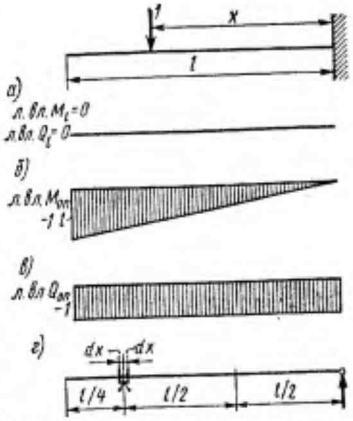


Рис. 8.7. К построению линий влияния защемленной в стену (*а*, *б*, *в*) и консольной (*г*) балок

Задание 3. Построить линию влияния Q_0 для опорного сечения той же консольной балки. Сечение смещено на dx в сторону консоли.

Задание 4. Построить линию влияния Q для опорного сечения той же консольной балки. Сечение смещено на dx в сторону междуопорной части (рис. 8.7, *г*).

§ 8.8. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛИНИЙ ВЛИЯНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСИЛИЙ ОТ СИСТЕМЫ СОСРЕДОТОЧЕННЫХ СИЛ P И РАВНОМЕРНО РАСПРЕДЕЛЕННОЙ НАГРУЗКИ Q

Построенной линией влияния пользуются для определения усилия в заданном сечении балки от различной комбинации сосредоточенных и сплошных нагрузок.

Предположим, что для сечения a балки построена линия влияния усилия R, имеющая вид, показанный на рис. 8.8, *а*.

Балка загружена сосредоточенными силами P_1, P_2, $P_к$ и равномерной нагрузкой q на участке l—a.

Ординаты линии влияния под силами P_1, P_2 и $P_к$ обозначим соответственно y_1, y_2, $y_к$.

Пользуясь принципом независимости действия сил, находим усилие в сечении a:

$$P_R=P_1y_1+P_2y_2+P_кy_к=\sum P_iy_i. \qquad (8.27)$$

Усилие от равномерной нагрузки найдем, заменив сосредоточенную нагрузку бесконечно большим количеством

бесконечно малых сосредоточенных сил:

$$R_q = \int q \, \mathrm{d}\, xy = q\Omega, \qquad (8.28)$$

где Ω — площадь линии влияния на длине загруженного участка. Полное усилие

$$R = \sum P_i y_i + q\Omega \qquad (8.29)$$

выражает собой продольную силу N, поперечную силу Q, момент M и т. д. в зависимости от построения линий влияния.

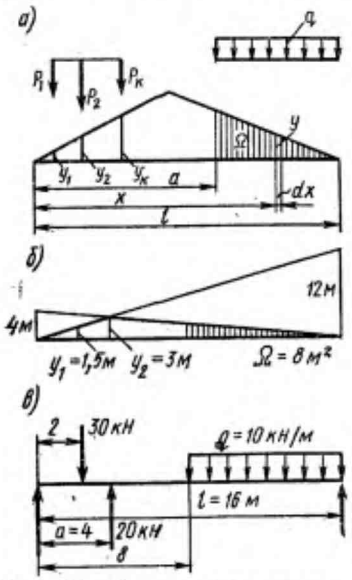


Рис. 8.8. Определение усилия от P и q на основе построенной линии влияния:

а — общие положения; *б*, *в* — к численному примеру расчета

Пример расчета. Построить линию влияния момента M от единичной силы для $^1/_4$ пролета балки $l=16$ м (рис. 8.8, *б*) и определить изгибающий момент в этом сечении от системы сил, изображенных на рис. 8.8, *в*.

Для построения линии влияния момента в сечении a следует отложить на опорах вертикальные отрезки $a=4$ м и $l-a=12$ м и провести наклонные прямые, определяющие заштрихованный треугольник.

Находим $y_1=12\cdot 2/16=1{,}5$ м; $y_2=12\cdot 4/16=3$ м; $\Omega=2\cdot 8/2=8$ м².

Расчетное усилие (изгибающий момент) в сечении (рис. 8.8, *в*)

$$M_a = 1{,}5\cdot 30 - 3\cdot 20 + 10\cdot 8 = 65 \text{ кН}\cdot\text{м}$$

При расчете балок, нагруженных крановыми тележками, для определения наибольших изгибающих моментов и поперечных сил необходимо сначала построить линии влияния M и Q для поперечных сечений ($0{,}1l$, $0{,}2l$ и т. д.). Далее следует определить усилие от нагруженной тележки с учетом того, что она занимает на балке разные положения, при которых усилия в изучаемых значениях ($0{,}1l$, $0{,}2l$ и т. д.) являются наибольшими (см. гл. 9).

§ 8.9. ЛИНИИ ВЛИЯНИЯ УСИЛИЙ СТЕРЖНЕВЫХ ФЕРМ

При загружении ферм движущимися нагрузками, например тележкой крана, целесообразно определять усилия в стержнях методом линий влияния. Линии влияния усилий

стержней фермы выражают зависимость величины усилий в стержнях от положения груза, равного единице, на ферме. Таким образом, для каждого стержня (элемента) фермы строится соответствующая линия влияния.

Груз может перемещаться как по верхнему, так и по нижнему поясу фермы в соответствии с загружениями реальными силами.

По продольным брускам перемещается груз, равный единице, воспринимаемый фермой через поперечные брусья. Таким образом осуществляется передача нагрузки на ферму по узлам.

В действительности такая надстройка нередко осуществляется в сооружениях. Если же она в действительности отсутствует, то для построения линий влияния продольных усилий поясов следует допустить, что она все же имеет место.

Докажем, что при перемещении груза от узла к узлу пояса линия влияния усилия в стержнях фермы определяется уравнением прямой линии.

Определим усилия в каком-либо стержне, например $2'3'$, когда $P=1$ последовательно находится в узлах $2'$ и $3'$.

Обозначим величину усилия рассматриваемого стержня $2'3'$ при положении груза в узле $2'$ через N_2, а при положении в узле $3'$ — N_3.

Если груз, равный 1, находится в панели на расстоянии от узла $2'$ (рис. 8.9, *а*), то ферма испытывает нагружения:

в узле $2'$:

$$P_{2'} = 1\,\frac{d-z}{d}, \qquad (8.30)$$

в узле $3'$:

$$P_{3'} = 1\,\frac{z}{d}. \qquad (8.31)$$

Таким образом, при перемещении груза от узла $2'$ до узла $3'$ усилие в стержне $2'3'$ может быть найдено

$$N = N_2\,\frac{d-z}{d} + N_3\,\frac{z}{d}, \qquad (8.32)$$

где N_2 и N_3 — величины, не зависящие, от z, d — длина панели.

Полученное уравнение представляет собой линейную функцию z.

Таким образом, усилие в элементе при перемещении груза от узла к узлу изменяется по закону прямой линии. Это используют при построении линий влияния элементов ферм.

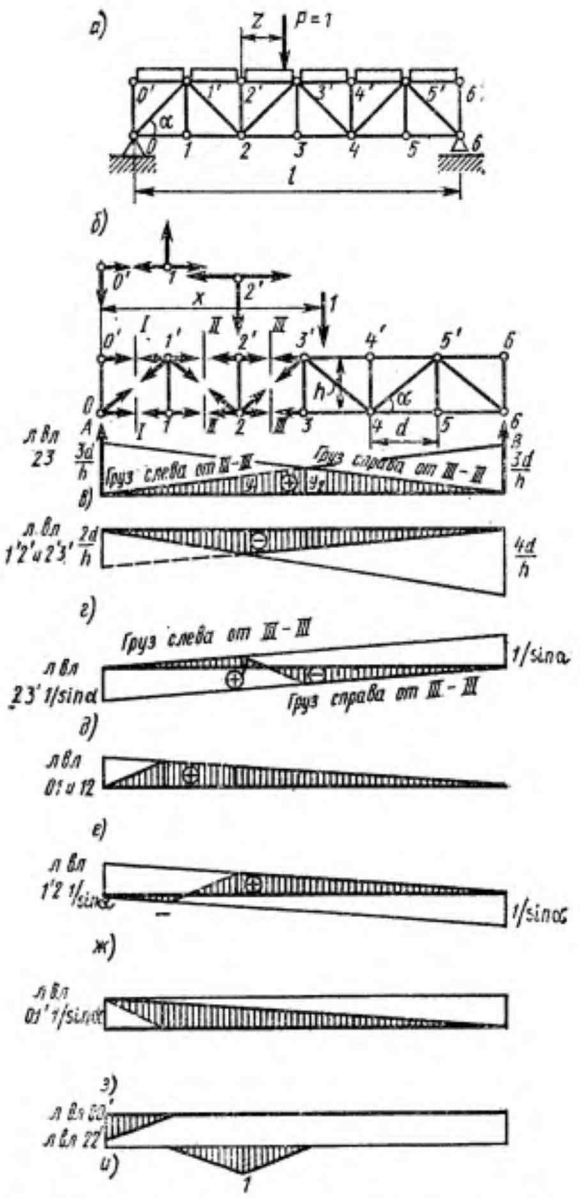


Рис. 8.9. Построение линий влияния усилий в стержнях ферм с параллельными поясами

Рассмотрим линии влияния усилий в стержнях фермы с параллельными поясами, которая опирается на две опоры (рис. 8.9, *а*).

Производим последовательно разрезы *III—III* и *II—II* (рис. 8.9, *б*).

Для построения линии влияния *23* рассмотрим уравнение равновесия $\sum M_3 = 0$.

При грузе, находящемся справа от разрезанной панели *III—III*, уравнение равновесия для левой части фермы будет

$$A3d - 23h = 0;$$

$$23 = A\frac{3d}{h}.$$

При $x=0$ $A=1$ и $23 = \frac{3d}{h}$;

при $x=l$ $A=0$ и $13=0$.

Проводим правую линию влияния *23*, которая верна при условии, что груз находится на участке от узла *6'* до узла *3'*.

При грузе, находящемся слева от разрезанной панели *III—III*, уравнение равновесия для правой части фермы будет

$$B3d - 32h = 0,$$

откуда

$$32 = B\frac{3d}{h}.$$

Аналогичным образом находим левую линию влияния, которая верна при грузе, находящемся на участке от узла *0'* до узла *2'*.

При перемещении груза от *2'* до *3'* линия влияния изменяется по закону прямой, изображенной на рис. 8.9, *б*, являющейся продолжением левой линии влияния.

Можно значительно упростить технику построения линии влияния усилия в стержне *23*, если учесть следующее.

При нахождении единичной силы в точке *3'* безразлично рассматривают ли равновесие левой отрезанной части фермы и выражают *23* через величину реакции *A* или правой части фермы и определяют *32* через реакцию *B*. В обоих случаях в уравнение равновесия не входит член, зависящий от единичной силы. Это означает, что ордината левой линии влияния (груз слева от разрезанной панели), определяемой из соотношения $B3d/h$, равна ординате правой линии влияния (груз находится справа от разрезанной панели), вычисляемой по $A3d/h$, т. е. правая и левая линии влия-

ния пересекаются под моментной точкой. Это важное свойство линий влияния, облегчающее их построение. В самом деле, проводим правую линию $23=A3d/h$, которая верна, пока груз находится на участке между узлами $3'$ и $6'$. Левая линия влияния, определяемая через реакцию B, имеет ординату, равную нулю на опоре A, и пересекается с правой линией под точкой $3'$. Эта прямая верна на участке между узлами $0'$ и $2'$. Между узлами $2'$ и $3'$ линия влияния выражается линейной функцией, т. е. прямой, представляющей собой продолжение левой линии влияния.

Аналогичным образом пишем условия равновесия $\Sigma M_2=0$ и строим линию влияния $2'3'$ (рис. 8.9, *в*).

Для определения усилия в раскосе $23'$ рассекаем ферму (рис. 8.9, *г*).

При грузе, находящемся справа от разрезанной панели, уравнение равновесия для левой части фермы запишется так:

$$A+23'\sin\alpha=0;$$

$$23'=-\frac{A}{\sin\alpha}.$$

При $x=0$ $23'=-1/\sin\alpha$;
при $x=l$ $23'=0$.

Проводим правую линию влияния $23'$, которая верна при грузе, находящемся на участке от узла $6'$ до узла $3'$ (рис. 8.9, *а*).

При грузе, расположенном слева от разрезанной панели, уравнение равновесия для правой части фермы запишется так:

$$B-3'2\sin\alpha=0;$$

$$3'2=\frac{B}{\sin\alpha}.$$

При $x=0$ $3'2=0$;
при $x=l$ $3'2=1/\sin\alpha$.

Левая линия влияния верна при грузе, находящемся на участке $0'2'$.

При перемещении груза на участке $2'3'$ линия влияния $2'3'$ определяется пунктирной прямой.

Линию влияния усилия $23'$ можно построить более простым способом, если учесть, что левая и правая прямые пересекаются под моментной точкой.

Находим сначала правую прямую, которая строится по уравнению $23'=A/\sin\alpha$.

Известно, что левая прямая имеет ординату на левой опоре, равную нулю, и должна пересечь правую под моментной точкой. Моментная точка при определении усилия в раскосе находится на пересечении направлений параллельных поясов, т. е. в бесконечности. Это указывает, что левая и правая линии влияния раскоса $23'$ параллельны между собой.

Линия влияния $1'2'$ строится из рассмотрения условия равновесия узла $2'$

$$\sum X=0$$

откуда следует, что $2'1'=2'3'$.

Линия влияния $0'1'$ строится с учетом условия равновесия узла $0'$

$$\sum X=0,$$

откуда следует, что $0'1'=0$.

Для построения линии влияния 12 проводится разрез *II—II* и пишутся условия равновесия $\Sigma M_{1'}=0$.

Очертание линии влияния *12* показано на рис. 8.9, *д*.

Из условия равновесия $\Sigma X=0$ в узле *1* следует, что линия влияния *10* равна линии влияния *12*.

Для построения линии влияния $1'2$ следует использовать условие равновесия $\Sigma Y=0$ (рис. 8.9, *е*).

При грузе, находящемся справа от разрезанной панели *II—II*,

$$A-1'2\sin\alpha=0.$$

При $x=0$ $1'2=A/\sin\alpha$;
при $x=l$ $1'2=0$.

проводим правую линию влияния $1'2$, которая верна при грузе, находящемся на участке от узла $6'$ до узла $2'$ (рис. 8.9, *е*).

При грузе, находящемся слева от разрезанной панели *II—II*,

$$B+21'\sin\alpha=0,$$

$$21'=-B/\sin\alpha.$$

При $x=0$ $21'=0$;
при $x=l$ $21'=1/\sin\alpha$.

Проводим левую линию влияния на участке $0'1'$. При перемещении груза от $1'$ до $2'$ линия влияния определяется уравнением прямой, изображенной на рис. 8.9, *е* пунктирной линией.

Аналогичным путем строим линию влияния усилия в стержне $01'$ (рис. 8.9, *ж*).

Построим линию влияния усилия в стойке $11'$. Из условия равновесия сил, приложенных в узле *1*, $\Sigma Y=0$ вытекает, что усилие $11'=0$.

Ординаты линии влияния стойки $33'$ также равны нулю.

При построении линии влияния усилия в стержне $22'$ следует рассмотреть условия равновесия $\Sigma Y=0$ в узле $2'$.

Если груз находится вне второй и третьей панелях, то усилие $2'2=0$.

Если груз находится в узле $2'$, то условие $\Sigma Y=0$ пишется таким образом: $-2'2-1=0$, при этом $2'2=-1$ (рис. 8.9, *и*).

При перемещении груза на участках $1'2'$ и $2'3'$ линия влияния имеет очертание треугольника (рис. 8.9, *ж*).

Линия влияния усилия в опорной стойке $00'$ находится из условия равновесия $\Sigma Y=0$ в узле $0'$ (рис. 8.9, *з*).

При отсутствии груза на первой панели $0'0=0$.

При нахождении груза в узле $0'$ уравнение равновесия запишется так:

$$-1-0'0=0,$$

откуда

$$0'0=-1.$$

При перемещении груза от узла *0* до узла *1* линия влияния усилия в стержне $00'$ определяется уравнением прямой, изображенной на рис. 8.9, *д* пунктирной линией.

§ 8.10. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ СТЕРЖНЕЙ ФЕРМ ПРИ НАХОЖДЕНИИ ГРУЗА НА ПОЯСЕ

Выше рассматривались случаи, когда перемещающийся груз, от которого строились линии влияния, не вызывал местного изгиба в поясе.

Допустим, что нагрузки приложены не в узлах ферм, а по длине панели. При этом нагрузки следует разложить по узлам обычным путем, от них определять продольные силы в стержнях фермы.

В нагруженных панелях помимо продольных сил действуют поперечные силы Q и изгибающие моменты M, которые определяют при рассмотрении нагруженного пояса фермы в качестве балки. Правильнее вычислить M и Q в панели, как и в неразрезанной балке, опорами которой служат узлы фермы.

В первом приближении вычисляют M и Q в нагруженной панели, как в однопролетной балке с шарнирными опорами, у которых пролет l равен длине панели d.

Более целесообразно рассмотрение панелей пояса как трехпролетной неразрезанной балки, опорами которой являются узлы фермы. По справочнику без труда находят расчетные величины M и Q для балки указанной системы, нагруженной силами P и q.

Определение M и Q заканчивается нахождением расчетных усилий. Подбор сечений элементов поясов и их расчет прочности производят согласно указаниям гл. 9.

Контрольные вопросы к главе 8

1. Что называется шарнирной фермой?
2. В чем основная разница между шарнирной фермой и механизмом?
3. На каком основании сварные фермы рассматриваются как шарнирные системы?

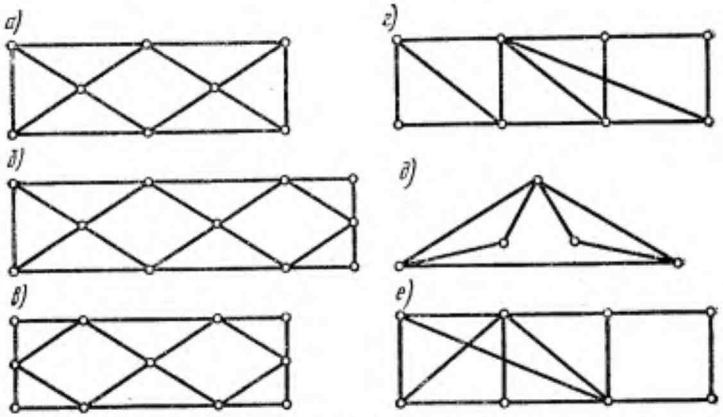


Рис. 8.10. К определению геометрической неизменяемости и статической определимости шарнирных систем

4. Что называется простейшей фермой?
5. Как записывает соотношение, определяющее геометрическую неизменяемость шарнирной фермы?
6. Если выполнено условие (8.1), то значит ли это, что система является геометрически неизменяемой?
7. Являются ли системы, изображенные на рис. 8.10, *а*. . .*в*, шарнирными фермами или механизмами?
8. Можно ли получить из простейших ферм другие системы, например путем замены одного стержня другим?
9. Являются ли системы на рис. 8.10, *г*. . .*е* геометрически неизменяемыми?
10. Как изменится геометрическая неизменяемость при добавлении дополнительных стержней?

11. Какие системы фермы называются статически определимыми?

12. Как пишется условие статической определимости шарнирной фермы в общем случае?

13. Как пишется условие статической определимости плоской шарнирной фермы, закрепленной в плоскости тремя стержнями?

14. Как определяются условия в стержнях фермы, если $i > 2k-3$?

15. В чем разница между статически неопределимыми системами на рис. 8.8, *а*. . .*д*?

16. В чем состоит метод РОЗУ?

17. В каких случаях целесообразно определять усилия методом вырезания узлов?

18. Когда этот метод следует заменить методом рассечения фермы?

19. В чем состоит аналогия между распределением усилий в поясах фермы и балки со сплошной стенкой?

20. В чем состоит аналогия между работой раскосов ферм с треугольной решеткой и параллельными поясами и балкой сплошного сечения?

21. Что понимают под прогибом фермы?

22. Как определяют вертикальную составляющую перемещения узла фермы по способу Мора?

23. Как определяют горизонтальную составляющую перемещения узла фермы по способу Мора?

24. Как находят полное перемещение узла фермы?

25. Как влияет на перемещения узлов деформации поясов и решетки фермы?

26. Может ли $\Sigma N N_1 l_i$ оказаться отрицательной величиной и что это означает?

27. Как определяют прогиб всех узлов пояса фермы, пользуясь теоремой Мора?

28. Как определяют прогиб узла фермы вследствие нагревания стержней?

29. В каком направлении произойдут перемещения нижнего пояса фермы при его нагревании?

30. В каком направлении произойдут перемещения верхнего пояса фермы при его нагревании?

31. Если стержни фермы нагружены равномерно и во всех элементах $\sigma=[\sigma]_p$, то как при этом преобразуется формула Мора?

32. Что называется линией влияния опорной реакции, изгибающего момента; поперечной силой?

33. Что называется линией влияния прогиба?

34. Какую размерность имеет линия влияния реакции, поперечной силы, момента?

35. Для скольких сечений балки возможно построение линии влияния?

36. Всегда ли линии влияния изгибающих моментов в двухопорной балке имеют треугольное очертание с вершиной под сечением и почему?

37. Какой вид имеет линия влияния, если балка имеет одну консоль?

38. То же, две консоли.

39. Можно ли строить линию влияния от пары с моментом $M=1$? Какой вид имеют линии влияния реакции и момента в середине пролета при перемещении $M=1$ по балке?

40. Как используется построенная линия влияния (A, Q, M) для определения соответствующего усилия при загружении всей балки равномерной нагрузкой?

41. То же, половины пролета.

42. Как строят линии влияния усилий стержней ферм?

43. Почему правый участок линии влияния для фермы (см. рис. 8.9, *в*) выражается через левую реакцию, а левый участок — через правую?

44. Почему левые и правые участки линий влияния пересекаются под моментной точкой?

45. Как объяснить, что усилие в элементе при перемещении груза, равного 1, от узла к узлу изменяется по закону прямой линии?

46. Изменяются ли линии влияния стержней поясов (см. рис. 8.9, *в*), если груз будет перемещаться по нижним узлам фермы?

47. Изменятся ли линии влияния стоек $00'$, $11'$, $22'$, $33'$, если груз будет перемещаться по нижним узлам фермы?

48. Как учитывается изгиб элементов поясов при перемещении груза по ним?

49. Как можно использовать линию влияния усилия в стержнях фермы для нахождения максимального усилия от тележки и двух сосредоточенных грузов?

50. Сколько опасных положений существует при определении усилий в раскосе $23'$ той же фермы (см. рис. 8.9, *г*)?

51. Сколько опасных положений тележки существует при определении усилий в стойке $22'$ той же фермы (см. рис. 8.9, *и*)?

52. Как определить усилие в элементе $01'$ от нагрузки равномерно распределенной по пролету фермы (см, рис, 8.9, *ж*)?

ГЛАВА 9

СВАРНЫЕ БАЛКИ

§ 9.1. ЭВОЛЮЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ФОРМ БАЛОК

С исторической точки зрения балки непрерывно эволюционировали.

На первоначальном этапе осуществляли изготовление балок прокаткой на примитивных станах с относительно небольшими поперечными сечениями. Большое значение имела прокатка двутавров.

Условие проката не позволяло придавать им наиболее рациональные формы, полки имели небольшую ширину, а стенка — значительную толщину.

Такой тип был не рационален с позиции использования металла. В балке, работающей на изгиб, наиболее напряженная зона — полка. Стенка нагружена в меньшей степени. Следует основную массу металла иметь в полках, а в стенках — меньшую долю. Сварка открыла возможность создания рациональных коробчатых профилей (рис. 9.1).

В настоящее время положение изменилось. Балки прокатываются с широкими полками с параллельными кромками (рис. 9.2,*а*), что облегчает взаимное сопряжение балок во взаимно перпендикулярных направлениях. Прокатываются тонкостенные двутавры.

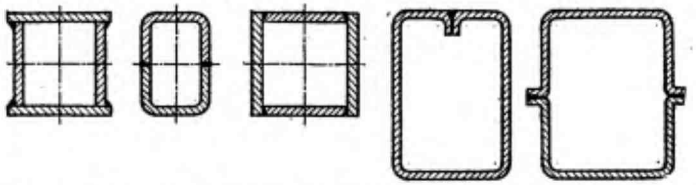


Рис. 9.1. Типы поперечных сечений сварных коробчатых балок

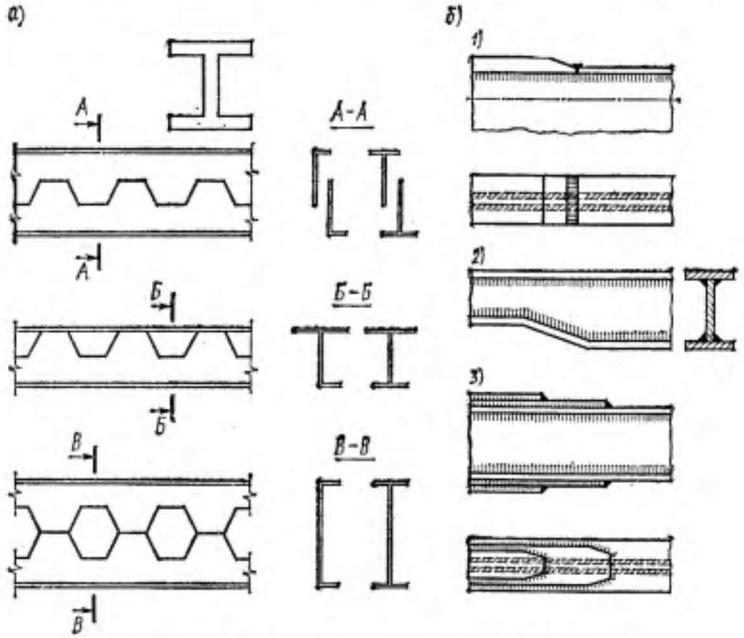


Рис. 9.2. Способы изготовления балок:

а — зигзагообразное разрезание проката балки; *б* — балки с изменяющимся поперечным сечением; *1* — по толщине листов; *2* — по высоте; *3* — по числу листов в поясах

Разработан метод зигзагообразного разрезания проката балки в продольном направлении с последующим смещением одной разрезанной половины относительно другой (рис. 9.2, *а*). Далее осуществляется сварка выступа переменной высоты и формы.

Таким путем значительно увеличились высота профиля, его момент инерции относительно горизонтальной оси, а следовательно, сопротивление изгибу. В некоторых случаях половины двутавров применяют из сталей разных свойств, после сварки образуются бистальные балки. Несмотря на повышение эффективности указанного мероприятия с позиции уменьшения массы, оно не получило широкого распространения в производстве из-за дополнительных технологических осложнений.

§ 9.2. ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ ИЗГОТОВЛЕНИЕ СВАРНЫХ БАЛОК

Подлинная революция в производстве произошла после создания сварных балок.

Сварка позволяет создавать балки всевозможных размеров — высотой до 3. . .4 м. и более а также любой длины.

Она позволяет наиболее рациональным образом сочетать размеры горизонтальных листов, часто называемых поясами, с вертикальной стенкой.

Применяются балки с толстыми широкими поясами в сочетании с высокими тонкими стенками.

Пояса нередко выполняются не только из листового проката, но и из других профилей, например прокатных швеллеров, а также при необходимости из гнутых профилей. Пояса могут состоять из двух листов и более, при необходимости обладать разными свойствами.

Показателем экономичности сечения балки служит параметр

$$\frac{W}{A},$$

где W — момент сопротивления профиля, см; A — площадь сечения профиля, см^2.

Чем выше это отношение, тем при меньшей массе металла достигается увеличение сопротивления профиля на изгиб.

Однако принимать чрезмерно тонкие вертикальные станки оказывается невозможным из-за недостатка местной устойчивости. Необходимо разумное сочетание размеров. Сварочный процесс допускает в этом отношении разные вариации.

Производство двутавров прокаткой при приблизительно одинаковых размерах со сварными — производительнее. Но огромные преимущества сварной конструкции, допу-

скающие ее оформление в желаемых соотношениях размеров, делают их более экономичными с позиций расхода металла, а во многих случаях и более рентабельными по стоимости.

Большое значение имеет характер производства. При крупносерийном производстве нередко оказывается рентабельнее прокатка, а при мелкосерийном и особенно в индивидуальном производстве — сварка.

Расширение строительства автоматизированных линий выдвигает сварные конструкции на первую линию перед другими способами их выполнения.

Выбор производства балки — прокаткой или сваркой — должен решаться при непременном использовании ЭВМ с учетом широкого комплекса факторов, определяющих рентабельность всего производственного цикла.

При расчете балок встречаются три вида задач.

1. Заданы размеры балки, известны расчетные усилия — изгибающие моменты и поперечные силы. Требуется проверить прочность балки. В этом случае определяют нормальные и касательные напряжения.

2. Задана балка и допускаемые напряжения. Требуется определить допускаемую нагрузку на балку. Эта задача также легко решается с использованием общеизвестных формул из курса «Сопротивление материалов».

3. Требуется спроектировать балку, обеспечивающую требуемую грузоподъемность. Эта задача решается следующим образом: от заданной нагрузки определяют опорные реакции, строят эпюры поперечных сил Q, изгибающих моментов M по длине и крутящих моментов, если последние имеют место.

При наличии подвижных нагрузок строят линии влияния опорных реакций, затем линии влияния Q и M для сечений $x=0$, $x=0{,}1l$, $x=0{,}2l$, . . . $x=0{,}5l$, где l — длина балки. В указанных сечениях вычисляют максимальные значения усилий при самом опасном для них положении подвижных нагрузок. После этого подбирают размеры поперечных сечений балки, обеспечивающие прочность. Из условия прочности расчетные напряжения не должны превышать $1{,}05\,[\sigma]_р$. При экономном подходе к расходу металла расчетное напряжение должно быть больше $0{,}95\,[\sigma]_р$, где $[\sigma]_р$ — допускаемое растягивающее напряжение для основного металла.

Поперечные сечения балок, в особенности двутаврового профиля, иногда изменяются по длине (рис. 9.2, *а*). В некоторых случаях изменяют толщину или ширину горизонтальных листов (рис. 9.2, *б*). Это более целесообразно, нежели изменять толщину вертикальных листов. Иногда горизонтальные пояса делают составными по толщине, если толщина пояса $s \geqslant 25. . .30$ мм, при этом в менее нагруженных листах число листов уменьшают (рис. 9.2, *б*).

Балки переменного сечения позволяют лучше использовать несущую способность металла по всей их длине. Они дают экономию металла в сравнении с балками постоянного профиля, значительная часть которых работает при напряжениях, значительно меньших допускаемых.

В технологическом отношении балки переменного профиля несколько сложнее. Вопрос выбора конструкций решается с экономических позиций, а иногда и с учетом общей компоновки и эстетики. Большинство типовых балок имеет профиль, постоянный по длине.

§ 9.3. РАСЧЕТ ЖЕСТКОСТИ И ПРОЧНОСТИ БАЛОК (ПОДБОР СЕЧЕНИЙ)

Балка должна удовлетворять требованию жесткости, т. е. ее прогиб f_{max} от наибольшей нагрузки не должен превышать предельно допускаемый. Обычно в балках предельное значение отношения f_{max}/l регламентируется нормами. Норма жесткости для балок разного назначения различна, например в подкрановых балках $f_{max}/l \leqslant 1/600. . .1/700$; в главных балках междуэтажных перекрытий $f_{max}/l \leqslant 1/400$.

Чтобы удовлетворить требованиям жесткости, балка должна иметь высоту не менее некоторой предельной. Эта минимальная высота определяется видом нагружения и допускаемыми напряжениями. Рассмотрим, какова должна быть наименьшая высота балки, свободно лежащей на двух опорах, если она нагружена равномерной нагрузкой q (рис. 9.3, *а*).

Расчетный прогиб в середине пролета

$$f = \frac{5}{384} \cdot \frac{ql^4}{EJ}, \qquad (9.1)$$

где EJ — жесткость балки.

Для рассматриваемой балки расчетный момент

$$M = \frac{ql^2}{8}. \qquad (9.2)$$

Подставляя значение M в формулу (9.1), получим

$$f = \frac{5Ml^2}{48EJ}; \qquad (9.3)$$

изгибающий момент

$$M = [\sigma]_p W, \tag{9.4}$$

где $[\sigma]_p$ — допускаемое напряжение; W — момент сопротивления.

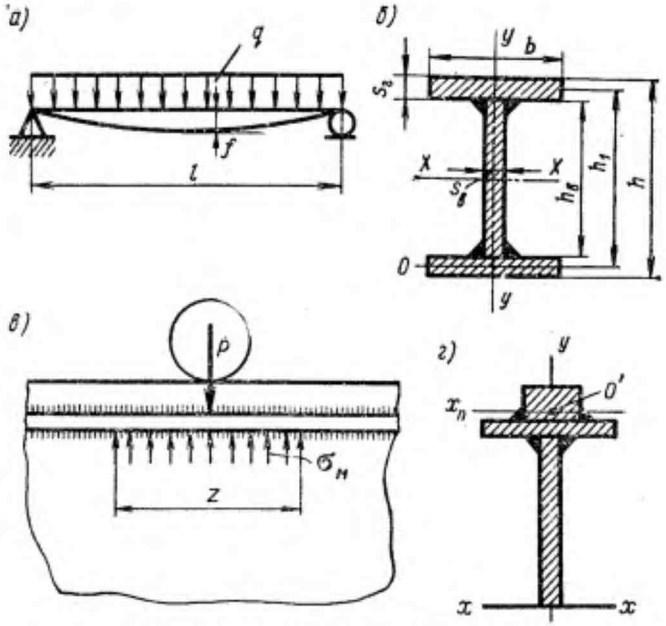


Рис. 9.3. К расчету сварной балки:
а — изогнутая ось балки от q; б — поперечное сечение балки; в, г — влияние сосредоточенной силы

Если расчетное сечение симметрично относительно горизонтальной оси, то $W = \frac{2J}{h}$, где h — высота балки.

Подставим значение M из формулы (9.2) в формулу (9.3):

$$f = \frac{5[\sigma]_p l^2}{24Eh}, \tag{9.5}$$

откуда

$$\frac{f}{l} = \frac{5[\sigma]_p l}{24Eh}, \tag{9.6}$$

или

$$\frac{h}{l} = \frac{5[\sigma]_p l}{24Ef}. \tag{9.7}$$

Таблица 9.1

Характеристики жесткости конструкций

Тип конструкции	f/l
Подкрановые балки и фермы:	
при ручных кранах	1/500
при электрических кранах грузоподъемностью до 50 т	1/600
при электрических кранах грузоподъемностью свыше 50 т	1/750
Монорельсовые пути	1/400
Балки рабочих площадок производственных зданий:	
главные при отсутствии рельсовых путей	1/400
прочие	1/250
Балки междуэтажных перекрытий:	
главные	1/400
прочие	1/250

Высота балки, вычисленная по формуле (9.7), является наименьшей при заданных $[\sigma]_p$ и f/l и может быть увеличена, если это диктуется соображениями компоновки конструкции или экономии металла. При других нагружениях и системах балок, например консольных, многоопорных с защемленными концами и т. п., в формуле (9.7) изменяется лишь числовой коэффициент φ_0. В общем случае

$$h = \varphi_0 [\sigma]_p l^2 / Ef. \tag{9.8}$$

Балки из стали Ст3 для различных элементов конструкций могут принимать следующие предельные отношения f/l (табл. 9.1).

При действии моментов в вертикальной M_x и горизонтальной M_y плоскостях должно удовлетворяться требование $(\sigma_x + \sigma_y) < [\sigma]_p$.

Балка должна удовлетворять прочности при условии наименьшей массы, т. е. поперечное сечение должно быть минимальным.

Высота балки для двутаврового профиля с этой целью может быть найдена по формуле

$$h = 1{,}3 - 1{,}4 \sqrt{\frac{M}{s_в [\sigma]_p}}, \tag{9.9}$$

а для коробчатого

$$h = \sqrt{\frac{M}{s_в [\sigma]_p}}, \tag{9.10}$$

где $s_в$ — толщина вертикального листа.

При проектировании балок толщина $s_в$ в формулах (9.9) и (9.10) неизвестна. Поэтому ее первоначально задают. Для разных строительных конструкций $s_в$ обычно изменяется в сравнительно узких пределах (рис. 9.3, *б*).

Можно принимать $s_в$=5. . .10 мм

$$s_в = \frac{\sqrt{10h_в}}{12{,}5}; \tag{9.11}$$

для тяжелых конструкций

$$s_в = 7 + 0{,}005h_в, \tag{9.12}$$

где $s_в$ и $h_в$ выражены в миллиметрах (рис. 9.3, *б*).

Значения h, найденные с учетом требований достаточной жесткости и прочности, а также при условии наименьшей массы, могут оказаться совершенно различными. Из двух значений, вычисленных для балки двутаврового профиля по формулам (9.7) и (9.8) или (9.9) и (9.10), следует принять большее и во всяком случае не меньшее, чем при вычислении по формулам (9.7) и (9.8).

Далее подбирают размеры поперечного сечения балки с учетом расчетного и изгибающего момента M и высоты h.

Рассмотрим процесс подбора сечения двутаврового профиля (рис. 9.3, *б*). Для этого найдем требуемый момент сопротивления

$$W_{тр} = \frac{M}{[\sigma]_р} \tag{9.13}$$

и требуемый момент инерции сечения

$$J_{тр} = W_{тр}\frac{h}{2}. \tag{9.14}$$

Вычислим момент инерции $J_в$ вертикального листа высотой $h_в$ и толщиной $s_в$. Принимаем $h_в$=0,95h.

Находим требуемый момент инерции двух горизонтальных листов:

$$J_г = J_{тр} - J_в. \tag{9.15}$$

В другой форме момент инерции выразится так:

$$J_г = 2\left[J_0 + A_г\left(\frac{h_1}{2}\right)^2\right], \tag{9.16}$$

где J_0 — момент инерции горизонтального листа относительно собственной оси, который всегда очень мал и может быть принят равным нулю; h_1 — расстояние между центрами тяжести горизонтальных листов, которое можно принять равным (0,96. . .0,98)h.

Из уравнения (9.16) находим требуемую площадь сечения одного горизонтального листа:

$$A_г = \frac{2J_г}{h_1^2}. \tag{9.17}$$

Подобрав размеры поперечного сечения балки, определим напряжения и таким образом проверим, удовлетворяют ли подобранные размеры условиям прочности.

Напряжение от изгиба

$$\sigma = \frac{Mh}{2J}. \tag{9.18}$$

Касательное напряжение от поперечной силы будет

$$\tau = \frac{QS}{Js_в}, \tag{9.19}$$

где Q — наибольшая поперечная сила балки; S — статический момент полуплощади сечения (симметричного) относительно центра тяжести балки (рис. 9.3, *б*).

Эквивалентные напряжения проверяются обычно в тех случаях, когда максимальные значения σ и τ совпадают по длине балки в одном сечении. Их определяют на уровне верхней кромки вертикального листа:

$$\sigma_э = \sqrt{\sigma_1^2 + 3\tau_1^2}. \tag{9.20}$$

Из формулы (9.20) имеем нормальное напряжение

$$\sigma_1 = \frac{Mh_в}{2J}; \tag{9.21}$$

касательное напряжение

$$\tau_1 = \frac{QS_1}{Js_в}, \tag{9.22}$$

где S_1 — статический момент площади горизонтального пояса относительно центра тяжести сечения балки.

В большинстве случаев эквивалентные напряжения $\sigma_э$ оказываются меньше σ, вычисленного по формуле (9.18).

Допустим, что к верхнему поясу балки прикладывают сосредоточенные перемещающиеся грузы (рис. 9.3, *в*). Это имеет место в крановых, подкрановых и мостовых балках. При этом определяют прочность вертикального листа с учетом местного напряжения под грузом:

$$\sigma_м = \frac{mP}{s_в z}, \tag{9.23}$$

где m — коэффициент, который имеет различные значения, $m=1{,}4\ldots1{,}5$ — при тяжелом режиме работы балки (например, в металлургических цехах); $m=1$ — при легком режиме (в ремонтных цехах и т. п.); z — условная длина, на которой сосредоточенный груз распределяется в вертикальном листе (рис. 9.3, *в*):

$$z=3{,}25\sqrt[3]{\frac{J_{\text{п}}}{s_{\text{в}}}}. \qquad (9.24)$$

Здесь $J_{\text{п}}$ — момент инерции горизонтального листа совместно с приваренным к нему рельсом (если таковой имеется) относительно оси $x_{\text{п}}$, проходящей через их общий центр тяжести (рис. 9.3, *г*).

При наличии программы легко с помощью ЭВМ определить размеры поперечного сечения проектируемой балки, обеспечивающие минимум массы металла и требуемую жесткость при изгибе.

§ 9.4. ОБЩАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ

Высокие балки, у которых $J_x>J_y$, под вертикальной нагрузкой могут терять общую устойчивость. Для предотвращения потери общей устойчивости следует:

1. Ограничивать свободную длину изгибаемого элемента. Например, две параллельные изгибаемые балки *1* и *2*

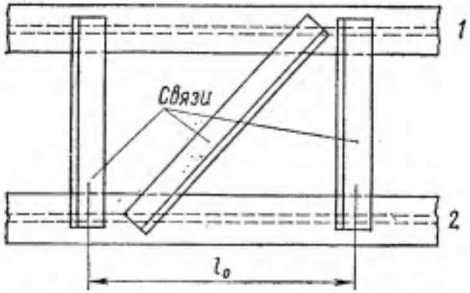


Рис. 9.4. Закрепление балки в горизонтальной плоскости

следует взаимно соединять связями на расстоянии l_0 (рис. 9.4), особенно сжатые пояса. Такие связи ставят в подкрановых балках, мостовых кранах и т. п.

2. Проверять напряжения в изгибаемой балке с учетом требований обеспечения общей устойчивости:

$$\sigma=\frac{M}{W}\leqslant[\sigma]_{\text{р}}\varphi, \qquad (9.25)$$

Таблица 9.2

Скорректированные значения коэффициента

Значения коэффициента φ, полученные по формуле (9.26)	Значения коэффициента φ, принимаемые в расчетах
0,85...1,0	0,85
1,0...1,25	0,90
1,25...1,55	0,96
1,55	1,0

где φ — коэффициент уменьшения допускаемых напряжений в балке с учетом обеспечения ее устойчивости. В балках двутаврового профиля нередко принимают

$$\varphi=\psi\frac{J_y}{J_x}\left(\frac{h}{l_0}\right)^2 10^3, \qquad (9.26)$$

где J_x и J_y — моменты инерции относительно осей x и y; h — полная высота балки; l_0 — пролет балки или расстояния между закреплениями, препятствующими перемещениям в горизонтальной плоскости; ψ — коэффициент.

Полученный при вычислении по формуле (9.26) результат следует корректировать по табл. 9.2.

Коэффициент ψ рассматривают как функцию α (табл. 9.3 и рис. 9, 3,*б*), т. е.

$$\alpha=8\left[\frac{l_0 s_{\text{г}}}{bh}\right]^2\left[1+hs_{\text{в}}^3/2bs_{\text{г}}^3\right]. \qquad (9.27)$$

Значения ψ приведены для двутавровых балок из стали Ст3. Для более прочных сталей значения ψ следует умножить на отношение $210/R$, где R — расчетное сопротивление для данных сталей.

Таблица 9.3

Значения коэффициента ψ как функции α

α	0,1	1,0	8,0	16,0	32,0	64,0
ψ	1,73	1,85	2,63	3,37	4,59	6,50

При проектировании балок целесообразно поступить следующим образом: предварительно задаться отношением $l_0/b=10\ldots20$; определить α по формуле (9.27), затем по табл. 9.3 найти значение ψ (b — ширина пояса балки).

§ 9.5. МЕСТНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ

Помимо проверки общей устойчивости необходимо проверить отдельные элементы балки на местную устойчивость. В сжатых поясах потеря устойчивости происходит, когда напряжения сжатия превышают критические значения.

Местная устойчивость сжатых поясов балок обеспечивается условием

$$b \leqslant 30 s_в \sqrt{\frac{210}{R}}, \qquad (9.28)$$

где b — ширина пояса; $s_в$ — толщина пояса; R — расчетное сопротивление.

Устойчивость вертикального листа в балках из низкоуглеродистой стали обеспечена, если при отсутствии сосредоточенных сил, перемещающихся по балке,

$$\frac{h_в}{s_в} \leqslant 110 \sqrt{\frac{210}{\sigma_т}}, \qquad (9.29)$$

а при наличии сосредоточенных сил, перемещающихся по балке,

$$\frac{h_в}{s_в} \leqslant 80 \sqrt{\frac{210}{\sigma_т}} \qquad (9.30)$$

($\sigma_т$ выражено в МПа).

В вертикальных листах балок потеря устойчивости может быть вызвана нормальными сжимающими напряжениями и комбинацией нормальных и касательных напряжений. Касательные напряжения τ вызывают в диагональных сечениях нормальные сжимающие σ_{max} и растягивающие σ_{min} напряжения.

Критические касательные напряжения (рис. 9.5, *а*), вызывающие потерю устойчивости вертикального листа, определяются по формуле

$$\tau_{кр} = v_0 \left[\frac{E}{1-\mu^2}\right]\left(\frac{s_в}{h_в}\right)^2, \qquad (9.31)$$

где μ — коэффициент Пуассона ($\mu=0{,}3$); $h_в$ — высота вертикального листа, v_0 — коэффициент, зависящий от отношения длины вертикального листа a между его закреплениями к его высоте h.

Если балка имеет значительную длину, а вертикальный лист не имеет закреплений, то v_0 можно принять равным 4,4.

Критические нормальные напряжения $\sigma_{кр}$ в вертикальном листе балок вычисляются по формуле, аналогичной формуле (9.31), но при других значениях коэффициента v_0 они выше, чем для $\tau_{кр}$.

В балках значительной длины $v_0=19$. Таким образом, $\sigma_{кр}$ менее опасны в отношении устойчивости, чем $\tau_{кр}$. На практике при определении устойчивости вертикальных листов балок приходится учитывать комбинированное действие нескольких видов напряжений.

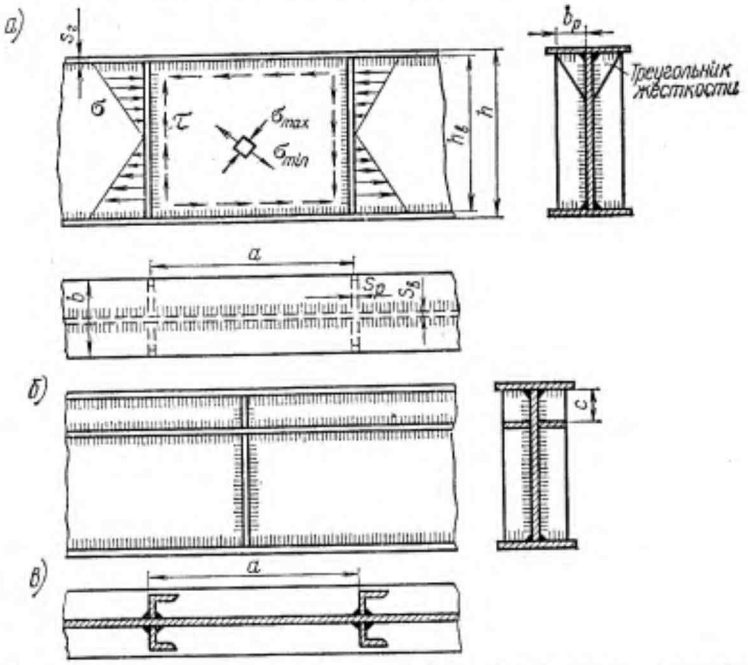


Рис. 9.5. К расчету местной устойчивости вертикальных листов балок:

а — образование напряжений σ и τ, вызывающих потерю устойчивости; *б*, *в* — постановка ребер жесткости

Для повышения местной устойчивости вертикального листа, т. е. для увеличения $\tau_{кр}$, при заданной высоте балки следует уменьшить a, устанавливая ребра жесткости. Постановка ребер жесткости необходима, если не соблюдены условия (9.29) и (9.30). Обычно вертикальные ребра жесткости конструируют из полос, реже — из профильного материала (рис. 9.5, *в*).

Ширину ребра (мм) принимают $в_р = h_в/30+40$ мм; толщину $s_р \geqslant b_р/15$. Расстояние между ребрами жесткости определяется значением напряжений и размерами балки, но не менее $1{,}2\,h_в$.

Помимо основных ребер жесткости, устанавливаемых по всей высоте вертикального листа балки, в интервалах между ними иногда ставят укороченные ребра жесткости треугольного очертания. Их высота составляет примерно $h_в/3$. Укороченные ребра (треугольники жесткости) иногда ставят при воздействии на пояс балки сосредоточенных грузов большой массы. Как правило, наличие таких ребер нежелательно, так как осесимметричное их расположение относительно оси вызывает при сварке искривление балки в вертикальной плоскости.

В балках большой высоты $h \geqslant 2{,}5 \ldots 3{,}0$ м иногда ставят горизонтальные ребра жесткости. Их располагают на расстоянии $c=(1/4 \ldots 1/5)h_в$ от верхнего горизонтального листа (рис. 9.5, *в*).

При отсутствии в балке подвижных нагрузок рекомендуется постановка ребер жесткости с одной стороны. Это дает экономию металла, но способствует образованию достаточного деформирования от несимметрично уложенных швов.

§ 9.6. РАСЧЕТ БАЛОК С УЧЕТОМ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ

Рассмотрим сопротивление элемента при изгибе нагруженной балки, например, как показано на рис. 9.6, *а*, *б*. Элемент имеет тавровое поперечное сечение (рис. 9.6, *в*).

В первой упругой стадии работы элемента напряжение распределяется в поперечном сечении по прямолинейному закону (рис. 9.6, *г*). Элемент в первой стадии работает, пока напряжение в крайнем волокне материала не станет равным $\sigma_т$ (рис. 9.6, *д*).

Во второй упругопластической стадии часть материала поперечного сечения элемента работает упруго, а часть — упругопластично.

В третьей пластической стадии работы поперечного сечения элемента упругая зона практически исчезает. Это предельная стадия. Равновесие между внешними и внутренними силами нарушается. Поперечное сечение балки начинает работать как пластический шарнир. Деформации элемента интенсивно растут. Такое состояние рассматривается как разрушение балки.

При образовании пластического шарнира нулевая линия, разделяя сечение на две равные части, смещается вверх относительно центра тяжести (рис. 9.6, *в*). При этом напряжение в крайних волокнах

$$\sigma = \frac{M_т}{2S}, \qquad (9.32)$$

где $M_т$ — изгибающий момент, при котором образуется пластический шарнир (все сечение охвачено текучестью); S — статический момент половины площади поперечного сечения изгибаемого элемента относительно его центра тяжести.

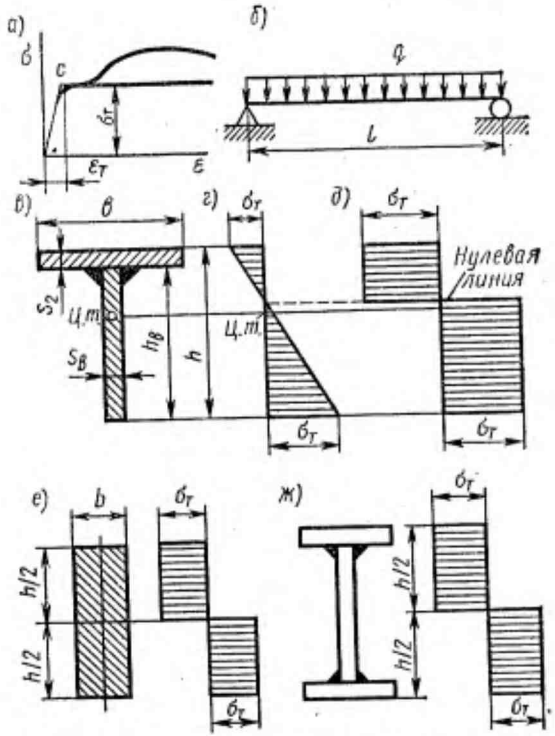


Рис. 9.6. Расчет балок на изгиб с учетом упругопластических деформаций:

а — схематизированная диаграмма деформаций; *б* — изгибаемая балка; *в*, *г*, *д* — упругие и пластические деформации в поперечном сечении балки таврового профиля; *е* — то же, прямоугольного; *ж* — то же, двутаврового

При расчете по пластическому методу допускаемый момент

$$M_{доп} = \frac{M_т}{k} = \frac{\sigma_т \cdot 2S}{k}, \qquad (9.33)$$

где k — коэффициент запаса прочности, равный 1,7 или 1,5.

С другой стороны, по теории упругих деформаций

$$M_{доп} = \frac{\sigma_т W}{k}. \qquad (9.34)$$

Учет пластичности позволяет при изгибе заменить W величиной $2S$.

Рассмотрим несколько примеров определения отношения $\frac{2S}{W}$:

а) элемент имеет прямоугольное поперечное сечение (рис. 9.6, *е*)

$$W=\frac{bh^2}{6};\quad S=\frac{bh^2}{4};\quad \frac{2S}{W}=1{,}5;$$

б) элемент имеет двутавровый профиль (рис. 9.6, *ж*). Если принять площадь одного пояса равной половине площади вертикальной стенки, то

$$\frac{2S}{W}\approx 1{,}13.$$

В нормальных прокатных двутаврах

$$2S/W=1{,}13\ldots1{,}18.$$

Коэффициент $2S/W$ особенно значительно возрастает в элементах, имеющих расположение материала, асимметричное относительно оси x.

Величину $W_{пл}$ называют пластическим моментом сопротивления и определяют как

$$W_{пл}=k'W_{упр}.$$

Чем выше коэффициент k', тем эффективнее сечение при расчете по методу пластических деформаций по сравнению с методом упругих деформаций.

Расчет балок по методу пластических деформаций применяется исключительно при действии на конструкцию статических нагрузок. Этот метод используется в СССР при проектировании пока еще редко. Его используют в ГДР и в некоторых капиталистических странах, но далеко не всегда. При его применении ограничивается величина касательных напряжений τ.

§ 9.7. РАБОТА БАЛОК НА КРУЧЕНИЕ

В тех случаях, когда балки работают на кручение, двутавровый профиль применять не целесообразно. Напряжение от кручения в незамкнутых профилях (двутавровых, уголковых и т. п.) (рис. 9.7, *а*, *б*)

$$\tau=\frac{M_{кр}s_{max}}{\alpha\sum v_i s_i^3 a_i},\qquad (9.35)$$

где $M_{кр}$ — крутящий момент; v_i — коэффициент, зависящий от отношения s_i/a_i, может быть принят равным 0,33; $\alpha=1$ — для уголка, $\alpha=1{,}3$ — для двутаврового профиля; a_i — больший размер сечения элемента; s — меньший размер того же сечения; s_{max} — наибольшая толщина профиля.

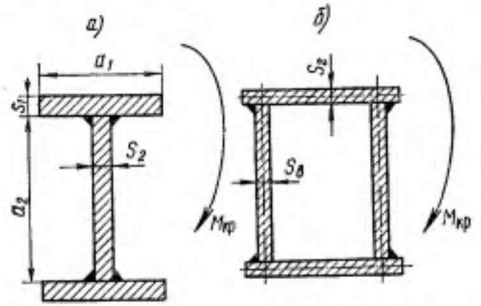


Рис. 9.7. К расчету балки на кручение:
а — двутавровый открытый профиль; *б* — трубчатый закрытый профиль

Так как момент сопротивления, как правило, невелик, то напряжение τ значительно.

При двутавровом профиле

$$\alpha\sum v_i s_i^3 a_i=0{,}43\,(s_в^3 h_в+2s_п^3 a_п).\qquad (9.36)$$

При кручении целесообразно применение сварных балок коробчатого поперечного сечения. Напряжение от крутящего момента с достаточной степенью точности может быть найдено по формуле

$$\tau=\frac{M_{кр}}{2As_{min}},\qquad (9.37)$$

где A — площадь сечения прямоугольника (рис. 9.7, *б*), ограниченного штрихпунктирными линиями; s_{min} — наименьшая толщина вертикального или горизонтального листа.

Так как площадь A велика, то напряжение τ оказывается незначительным.

Эффективность применения коробчатых сечений по сравнению с открытыми при кручении весьма велика.

Пример. Сечение балки, изображенной на рис. 9.7, *б*, имеет размеры листов $10\times 1\text{см}^2$.

Допустимый момент кручения

$$M_{кр_1}=2\cdot10\cdot10\cdot0{,}5\ \tau=100\ \tau.$$

Если снять один из листов, например верхний, сечение примет ⊔-образный профиль, тогда

$$M_{кр_2}=0{,}43\,(1^3\cdot 10+2\cdot 1^3\cdot 10)\,\tau=12{,}9\tau.$$

Сопротивляемость кручению уменьшилась более чем в 7 раз.

§ 9.8. СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Горизонтальные листы соединяются с вертикальными поясными швами. Они, как правило, угловые (*1*) и в редких случаях при наличии сосредоточенных перемещающихся грузов большого веса или при действии переменных нагрузок — с подготовкой кромок (*2*) (рис. 9.8).

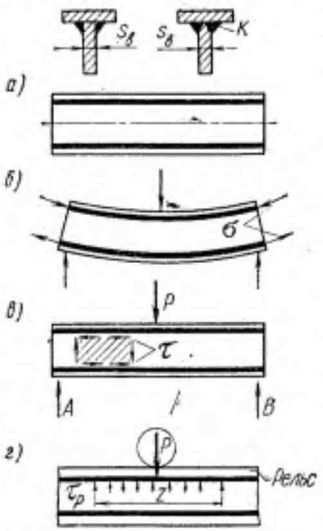


Рис. 9.8. К расчету поясных швов сварных балок: *а* — типы швов; *б* — связующие напряжения σ от изгиба; *в* — рабочие напряжения τ; *г* — образование в швах рабочих напряжений τ_p под сосредоточенной силой

Если балка (рис. 9.8, *а*) работает на поперечный изгиб, то в поясных швах вследствие совместной деформации шва и основного металла возникают связующие нормальные напряжения σ, которые в учет не принимаются (рис. 9.8, *б*), и рабочие касательные напряжения τ (рис. 9.8, *в*). Поясные швы обеспечивают работу на изгиб всего сечения как единого целого. Срезывающие усилия на уровне крайних кромок вертикального листа на единицу длины определяются по формуле

$$T=\frac{Q\cdot s}{J}, \qquad (9.38)$$

где S — статический момент площади пояса относительно центра тяжести сечения; Q — поперечная сила в сечении.

Роль касательных напряжений τ существенна, несмотря на то, что они часто невелики по значению. В двусторонних швах с катетом K касательные напряжения

$$\tau=\frac{Q\cdot S}{2J\beta K}, \qquad (9.39)$$

где β — коэффициент, равный для ручной сварки 0,7; J — момент инерции сечения.

При наличии в вертикальном листе подготовки кромок касательные напряжения определяются по формуле

$$\tau=\frac{Q\cdot S}{Js_в}. \qquad (9.40)$$

При сварке конструкций, у которых толщина листов $s_в\geqslant 4$ мм, принимаем $K\geqslant 4$ мм.

Прерывистые швы не целесообразны, так как при этом затрудняется применение автоматической сварки и возникает дополнительная концентрация напряжений.

При наличии в балке сосредоточенных перемещающихся грузов поясные швы принимают некоторое участие в передаче нагрузки с горизонтального листа на вертикальный (рис. 9.8, *г*). Это имеет место вследствие неплотного их взаимного соприкосновения. Если груз перемещается по рельсу, прикрепленному к поясу балки, то напряжение τ_p в поясных швах определяется по формуле

$$\tau_p=\frac{nP}{2z\beta K}, \qquad (9.41)$$

где P — вес сосредоточенного груза; n — коэффициент, зависящий от характера обработки кромок вертикального листа (обычно $n=0{,}4$); z — расчетная длина шва, по которой происходит передача давления с пояса на вертикальный лист (определяется по формуле (9.24)).

В ряде случаев, например в подкрановых или крановых балках, поясные швы в верхней зоне в результате локального действия сосредоточенных сил P испытывают значительные усилия. При этом их целесообразно оформлять с катетами в отношении 1,5 : 1 или 2 : 1 с обеспечением глубокого проплавления.

При расчете целесообразно принять $\beta=0{,}7$, несмотря на автоматический метод сварки.

После вычисления τ_p определяют условное результирующее напряжение:

$$\tau_{рез}=\sqrt{\tau^2+\tau_p^2}\leqslant[\tau']. \qquad (9.42)$$

Швы, приваривающие ребра жесткости, как правило, на прочность расчетом не проверяются. Они выполняются угловыми с катетом, составляющим (0,3. . .0,6) от толщины вертикального листа $s_в$. Эти швы в опорных сечениях, а также в местах приложения сосредоточенных сил непременно выполняют непрерывными. Ребра жесткости вне опорных сечений в наиболее напряженных волокнах растянутой зоны иногда не приваривают.

В балках, работающих под статической нагрузкой, рекомендуется укладка односторонних угловых поясных швов при автоматической сварке и соответственно с глубоким проплавлением. Также возможна укладка односторонних швов при приварке ребер жесткости.

§ 9.9. СТЫКИ

Расчет прочности стыков балок производится обычно на изгиб. Напряжение в стыке определяется как

$$\sigma = \frac{M}{W} \leqslant [\sigma]_р. \qquad (9.43)$$

Если допускаемое напряжение в соединении (в шве или прилегающей к шву зоне) $[\sigma']_р < [\sigma]_р$, то такой стык оказывается неравнопрочным целому сечению. В этом случае стыки целесообразно помещать в сечениях, удаленных от зон максимальных моментов, чтобы выполнялось условие $\sigma \leqslant [\sigma']_р$. Если $\sigma \geqslant [\sigma']_р$, а стык должен находиться в зоне, где M имеет максимальное значение, то допускается произвести местное усиление балки привариванием к ее поясу дополнительных горизонтальных листов, увеличивающих момент инерции и момент сопротивления в расчетном сечении. При этом

$$\sigma = \frac{M}{W'} \leqslant [\sigma']_р. \qquad (9.44)$$

где W' — момент сопротивления сечения усиленной балки.

К накладкам прибегают редко, так как они являются источником образования концентрации напряжений и их применение ухудшает работу балок под переменными нагрузками.

В некоторых случаях стыки проектируют косыми. Это неудобно в технологическом отношении. Более рационально применение обычных стыков, выполненных технологическими процессами высокого качества.

§ 9.10. ПРИМЕНЕНИЕ ШТАМПОВАННЫХ И ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ

Типы поперечных сечений балок из штампованных и гнутых профилей показаны на рис. 9.9. Как правило, эти конструкции тонкостенные (s=1. . .5 мм). Рационально применение в балках тонкостенных штампованных и гнутых элементов, соединенных контактной точечной сваркой

(рис. 9.10, *а*. . .*з*). Дуговая сварка гнутых профилей осложняется, если укладку шва производят по зоне пластической деформации, вызванной в процессе изготовления элемента. В этих зонах возможно старение металла, т. е. ухудшение

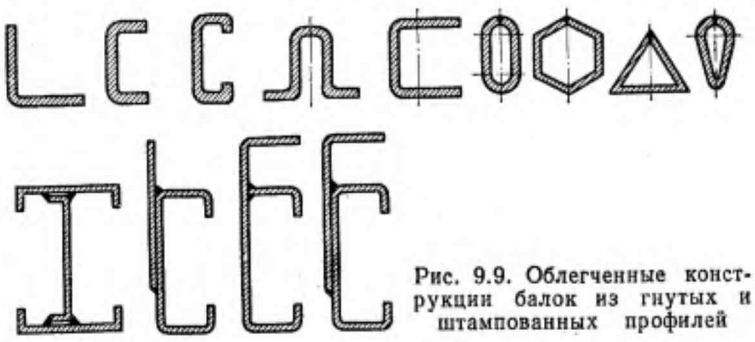


Рис. 9.9. Облегченные конструкции балок из гнутых и штампованных профилей

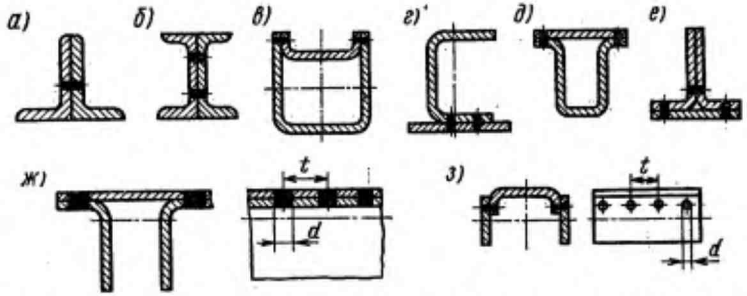


Рис. 9.10. Примеры поперечных сечений балок, сваренных точечной сваркой:

а, б — в связующие соединения; *в, г, д, е, ж, з* — рабочие соединения

пластических свойств и образование трещин. Сварные точки и швы располагают в местах, удаленных от зон пластического деформирования.

В поперечных сечениях балок, изображенных на рис. 9.10, *а, б*, точки являются связующими. Они не несут рабочих усилий и расчету на прочность не подлежат. В сечениях балок, изображенных на рис. 9.10, *в*, точки являются рабочими. Срезывающее усилие на единицу длины балки определяется по формуле (9.35). Касательное усилие на участке балки длиной, равной расстоянию между точками, определяют по формуле

$$T = \frac{Q \cdot S}{J} t. \qquad (9.45)$$

Шаг t, который является расстоянием между точками, должен быть не более 30 s_{min} в сжатой зоне и не более 40 s_{min} в растянутой, где s_{min} — минимальная толщина стенки.

Срезывающие напряжения в точке находятся по формуле

$$\tau = \frac{T}{2\pi\frac{d^2}{4}}, \qquad (9.46)$$

где d — диаметр точки (в сечении находятся две точки).

Обычно рабочие напряжения точек в конструкциях указанного типа незначительны.

§ 9.11. БАЛКИ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Для алюминиевых балок рекомендуется применение сплавов АВ (Al+Mg+Si), алюминиево-магниевых (АМг5, АМг6, АМг61), алюминиево-магниево-цинковых (В92). В этих сплавах в зависимости от состояния и термической обработки пределы прочности стыковых сварных соединений $\sigma_в'$ составляют $(0{,}6\ldots0{,}9)\sigma_в$. Чем прочнее сплав, тем ниже коэффициент. Для повышения прочности стыковых соединений в отдельных случаях применяют косые швы. Целесообразно применение прессованных, штампованных и гнутых профилей.

При конструировании алюминиевых балок следует избегать концентрации напряжений, особенно в зонах сварных соединений. На рис. 9.11 показана конструкция узла сопряжения сварных балок из алюминиевых сплавов. Швы располагаются вне зоны наибольших нормальных напряжений и зон со значительными концентраторами напряжений.

Конструкции из алюминиевых сплавов имеют значительно меньшую жесткость по сравнению со стальными. Балкам для различных элементов конструкций целесообразно устанавливать следующие значения f/l:

Подкрановые балки (грузоподъемность крана 50 т)	1/600
Балки междуэтажных перекрытий	1/400...1/200
Балки покрытий	1/250...1/200

Если для сварных алюминиевых балок отношение высоты к толщине вертикального листа составляет $h_в/s_в \leqslant 80$ для сплава АМг $h_в/s_в \leqslant 70$ для сплава АВТ-1 (термически обработанного и искусственно состаренного), то ребра жесткости не ставятся, или их ставят на расстоянии, равном $a \leqslant 2{,}4\ h$, друг от друга.

Алюминиевые сплавы — прогрессивный материал с позиции малой удельной плотности (в 2,5 раза ниже стали), антикоррозионности, хорошей сопротивляемости при низких температурах, но очень чувствителен к

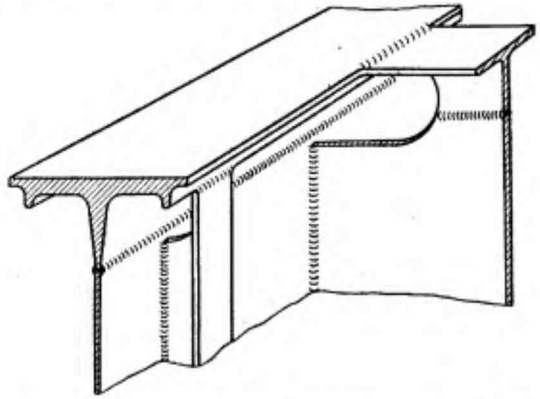


Рис. 9.11. Конструкция сварного узла балок из алюминиевых сплавов

концентраторам и требует тщательной обработки форм конструкций и высокой культуры технологии. Пока его стоимость значительно выше стали.

Широкое распространение алюминиевые сплавы получили в авиационной промышленности, на транспорте, в строительстве.

§ 9.12. ОПОРНЫЕ ЧАСТИ

Опорные части балок, чтобы обеспечить шарнирность опирания, часто конструируют в форме выпуклых плит. Изготовление плоских плит нерационально. При очень больших нагрузках опорные части выполняют сварными. Пример конструкции опорной выпуклой плиты приведен на рис. 9.12. На одной из опор балка, как правило, имеет продольную подвижность, на другой — она закреплена болтами или штырями. Ширина опорной плиты b_0 принимается равной $(1{,}1\ldots1{,}2)\ b$, длина плиты $a = (1{,}0\ldots1{,}5)\ b$.

Плиты изготовляют стальными: толщина их у конца $s_0 = 10\ldots15$ мм, радиус цилиндрической поверхности $R = 1\ldots2$ м. Толщина плиты на оси находится из условия ее прочности при работе на изгиб. Реактивные усилия, дей-

ствующие на единицу длины плиты, обозначим q. От нагрузки q на оси плиты образуется поперечная сила

$$Q=\frac{qa}{2}=\frac{A}{2}. \qquad (9.47)$$

Изгибающий момент по оси плиты

$$M=\frac{qa^2}{8}=\frac{Aa}{8}. \qquad (9.48)$$

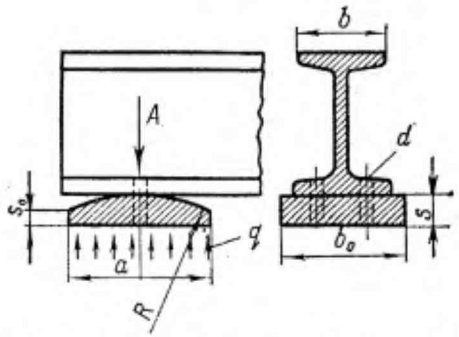


Рис. 9.12. Конструкция опорной части балки

Момент сопротивления сечения плиты, ослабленной отверстиями штырей, определяется из соотношения

$$W=(b_0-2d)\frac{s^2}{6}. \qquad (9.49)$$

Требуемая толщина плиты

$$s=\sqrt{\frac{6W}{b_0-2d}}. \qquad (9.50)$$

§ 9.13. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ БАЛОК НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ И ПУТИ ЕЕ ПОВЫШЕНИЯ

Радикальным путем повышения усталостной прочности является устранение концентрации напряжений.

При испытаниях сварных балок под статической нагрузкой установлено, что остальные сварные балки обладают необходимой прочностью, однако распределение напряжений в них по поперечному сечению происходит неравномерно. В широких горизонтальных листах балок двутаврового профиля напряжения у оси больше, чем по кромкам. При наличии прерывистых поясных швов сечение балки не работает как одно целое. В зоне кромок вертикального листа наблюдается концентрация напряжений. При непрерывных

швах она значительно меньше. Концентрация напряжений имеет место и в случае приложения к поясу балки сосредоточенной силы (колеса крана). Чем больше жесткость пояса балки с приваренным к нему рельсом, тем на большую зону

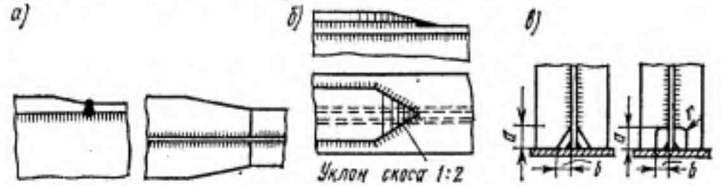


Рис. 9.13. Конструктивное оформление балок, работающих под переменными нагрузками

вертикального листа распределяется сосредоточенная сила и тем меньше концентрация напряжений. Поясные швы двутавровых балок в случае смещения оси кранового пути относительно оси балки нередко работают неудовлетворительно.

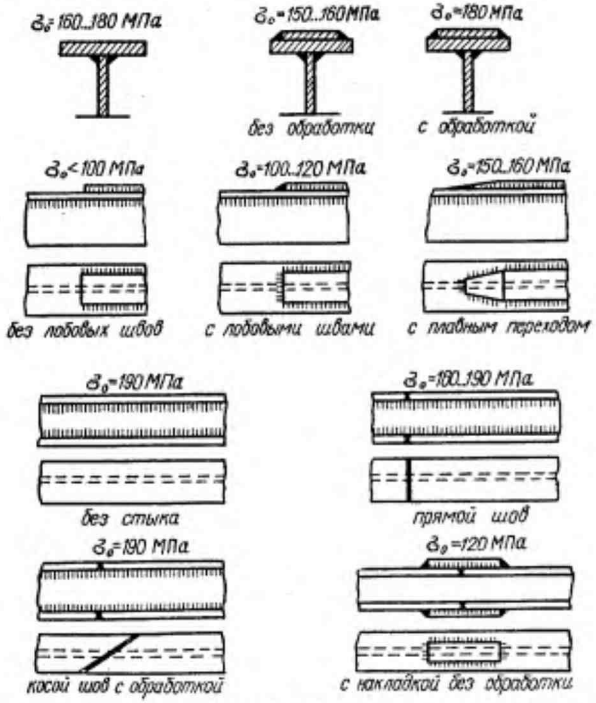


Рис. 9.14. Пределы выносливости сварных балок

Сварные балки хорошо работают под переменными нагрузками при условии, если рационально выбраны формы конструкций и технологический процесс сварки. Эти балки должны быть выполнены таким образом, чтобы уменьшить возможность образования в них концентраторов напряжений. Все стыки элементов по длине должны быть сварены стыковыми швами без применения накладок. На рис. 9.13, *а* показаны примеры стыков горизонтальных листов с плавным изменением их толщины и ширины. На рис. 9.13, *б* — рациональные обрывы накладок. Ребра жесткости целесообразно приваривать так, как это показано на рис. 9.13, *в*. К растянутому поясу и в растянутой зоне вертикального листа на длине $a=(0{,}1\ldots0{,}2)h_в$ ребра жесткости не рекомендуется приваривать вовсе ($b\approx0{,}5a$).

На рис. 9.14 приведены примеры сварных балок из низкоуглеродистой стали и их пределы выносливости при пульсирующих нагрузках. Испытания показали, что применение накладок, приваренных к поясам угловыми швами, значительно снижает усталостную прочность конструкции. Наибольшей усталостной прочностью обладают балки без стыков и с косыми механически обработанными стыковыми соединениями.

§ 9.14. ПРИМЕРЫ КОНСТРУКЦИИ БАЛОК

На рис. 9.15 приведена типовая конструкция подкрановой балки пролетом $l=12$ м под краны грузоподъемностью 5. . .75 т (проект ЦНИИПСК). С изменением нагрузки меняется высота H и размеры поперечных сечений балок, а

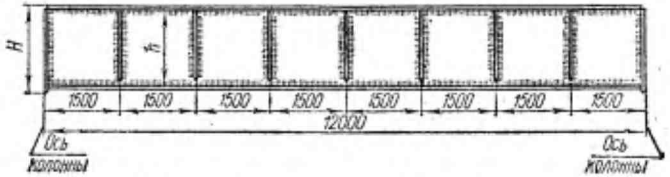


Рис. 9.15. Конструкция сварной подкрановой балки

разбивка ребер жесткости остается прежней. Сварка поясных швов автоматическая. При тяжелом режиме работы катет поясных швов $K=0{,}85s_в$ — в сжатой зоне; $K=0{,}65s_в$ — в растянутой зоне. Сварка выполняется с полным проваром стенки.

Подкрановые балки нередко имеют длину пролетом 24; 36 м и более. При этом целесообразно применение высокопрочных металлов с высоким пределом текучести. Обеспечить устойчивость подкрановой балки двутаврового профиля из указанных материалов трудно, так как балки получаются высокими. Поэтому более рациональными оказываются коробчатые профили с тонкими вертикальными листами. При значительной высоте последних листы свариваются по длине продольными стыковыми швами. Толщина горизонтальных листов, как правило, не должна превышать 40. . .50 мм.

Подкрановые балки с пролетом 36 м, в особенности под тяжелые краны, могут быть усилены шпренгелями (рис. 9.16), состоящими из горизонтальной затяжки, стоек и подкосов. Шпренгельная балка представляет собой статически неопределимую систему. За лишнее неизвестное в уравнениях деформаций принимается усилие затяжки H, которое образуется при изгибе балки вследствие увеличения расстояния между точками A—A. При этом момент в сечении балки

$$M=M_0-Hy,$$

где M_0 — момент при отсутствии шпренгеля в балке; y — плечо силы H относительно оси балки.

Затяжка шпренгеля создает полезный изгиб балки противоположного знака от вертикальной нагрузки.

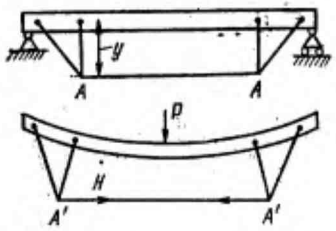


Рис. 9.16. Сварная шпренгельная балка

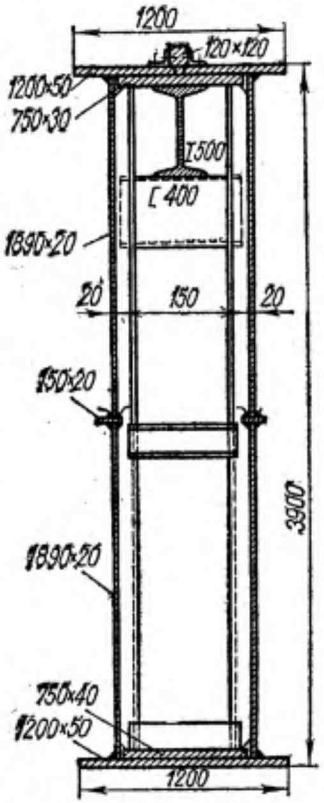


Рис. 9.17. Поперечное сечение подкрановой балки

Повышение прочности может быть достигнуто предварительным напряжением балок, т. е. созданием полезных сжимающих напряжений в зонах с наибольшими напряжениями растяжения. Например, вертикальный лист в растянутом состоянии приваривается к полкам. В последних образуется сжатие.

На рис. 9.17 изображено поперечное сечение подкрановой балки для кранов грузоподъемностью 300 т.

В настоящее время много внимания уделяется типизации конструкций балок (например, подкрановых). В соответствии с пролетом, нагрузкой и режимом работы крана устанавливают рекомендации применения для подкрановой балки определенной марки стали: низкоуглеродистой или низколегированной конструкционной. Разрабатывают также рациональные конструкции однопролетных и многопролетных подкрановых балок.

§ 9.15. ПРИМЕР РАСЧЕТА И КОНСТРУИРОВАНИЯ БАЛКИ

Требуется разработать конструкцию сварной балки пролетом $l=16$ м со свободно опертыми концами. Допускаемое напряжение в подкрановых балках устанавливаем с учетом коэффициентов условий работы $m=0{,}9$ и перегрузки $n=1{,}2$; для стали Ст3кп $[\sigma]_p=160$ МПа.

Балка нагружена равномерной нагрузкой от собственного веса $q=2{,}5$ кН/м и двумя сосредоточенными грузами $P=50$ кН (от веса тяжести тележки с грузом), которые могут перемещаться по балке. Расстояние между осями тележки $d=2$ м, наибольший прогиб балки f от сосредоточенных грузов не должен превышать $1/500$ пролета l (рис. 9.18, *а*).

Конструирование балки следует начать с определения расчетных усилий M и Q. Сначала необходимо построить линии влияния моментов, чтобы знать их максимально возможные значения в разных сечениях балки (рис. 9.18, *б*) (метод линий влияния рассмотрен в гл. 8). Максимальные ординаты y_{max} линий влияния для различных сечений x составят

x	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
y_{max}	0,09	0,16	0,21	0,24	0,25

Определим моменты от веса тележки в каждом из сечений с учетом того, что один из сосредоточенных грузов располагается над вершиной линии влияния, а второй — занимает положение, показанное на рис. 9.18, *б*. Момент от сосредоточенных сил вычисляется по формуле

$$M_P=\sum P y_i, \tag{9.51}$$

где y_i — ордината линии влияния, т. е.

$$M_P=y_{max}\left[1+\frac{l-x-d}{l-x}\right]P. \tag{9.52}$$

Момент в сечении x от равномерно распределенной нагрузки

$$M_q=\frac{qlx}{2}-\frac{qx^2}{2}. \tag{9.53}$$

Суммарные моменты в сечениях от сосредоточенных сил и равномерной нагрузки

$$M_\Sigma=M_P+M_q. \tag{9.54}$$

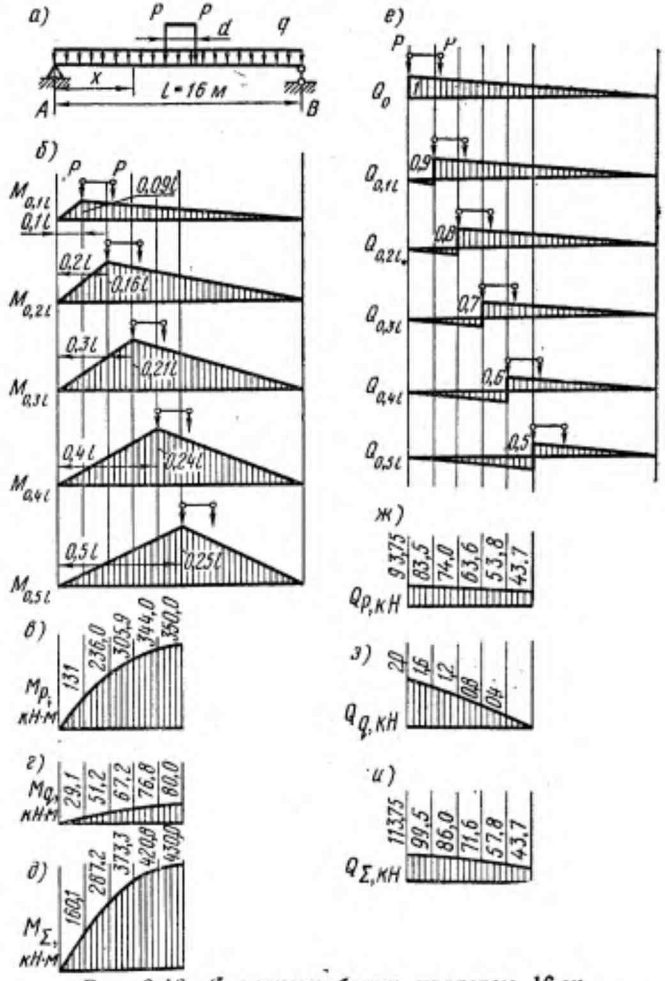


Рис. 9.18. К расчету балки пролетом 16 м:

а — схема балки; *б* — линии влияния; *в* — наибольший момент M от подвижной нагрузки в разных сечениях; *г* — эпюра M от q; *д* — наибольший расчетный момент M от сил P и q в разных сечениях; *е* — линии влияния поперечной силы Q; *ж* — наибольшие значения Q от подвижной нагрузки в разных сечениях; *з* — эпюра Q от q; *и* — наибольшие расчетные значения Q в разных сечениях

Результаты подсчетов представлены на рис. 9.18, *в*. . .*д*. Таким образом, расчетное значение момента для балки составляет

$$M_\Sigma = 430 \text{ кН}\cdot\text{м} = 0{,}43 \text{ МН}\cdot\text{м}.$$

Требуемый момент сопротивления балки для этого момента

$$W_{тр} = M_\Sigma/[\sigma]_р = 0{,}43\cdot 160 = 0{,}002688 \text{ м}^3 = 2688 \text{ см}^3.$$

Производим построение линии влияния поперечной силы (рис. 9.18, *е*).

Ординаты Q для различных сечений x составят

x	. . . . .	0...0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Q	. . . . .	1...0,9	0,8	0,7	0,6	0,5

Определим расчетные усилия от сосредоточенных сил в каждом из указанных сечений с учетом того, что одна из них располагается над вершиной линии влияния:

$$Q_P = \sum P y_i, \tag{9.55}$$

т. е.

$$Q_P = P\left(1 + \frac{l-x-d}{l-x}\right). \tag{9.56}$$

Поперечные силы Q от силы тяжести q

$$Q_q = \frac{ql}{2} - qx. \tag{9.57}$$

Суммарные значения поперечных сил от сосредоточенных и равномерно распределенных нагрузок

$$Q_\Sigma = Q_P + Q_q. \tag{9.58}$$

Результаты подсчетов представлены на рис. 9.18, *ж*. . .*и*.

Определив расчетные усилия, переходим к нахождению наименьшей высоты балки из условия нормы жесткости $f_{max}/l = 1/500$ при сосредоточенных нагрузках P. При определении требуемой высоты следует учесть, что по условию прогиб ограничен лишь в отношении нагрузки P. Так как напряжение от суммарного момента $M_\Sigma = 430$ кН·м достигает $[\sigma]_р$, то напряжение от момента, вызванного сосредоточенными грузами $M = 350$ кН·м, что будет составлять $0{,}8\,[\sigma]_р$. Это напряжение следует брать вместо $[\sigma]_р$ при определении требуемой высоты балки h.

Прогиб балки от двух сосредоточенных сил P, расположенных симметрично в пролете (рис. 9.19, *а*. . .*е*),

$$f = \frac{Pal^2\,[1 - 4/3\,(a/l)^2]}{8EJ}. \tag{9.59}$$

Подставив в (9.59) значение $Pa = M$, получим

$$f = \frac{Ml^2\left[1 - 4/3\left(\frac{a}{l}\right)^2\right]}{8EJ}. \tag{9.60}$$

Если выразить M в формуле (9.60) через напряжение $0{,}8[\sigma]_р$, вызванное сосредоточенными силами и умноженное на момент сопротивления $W = \frac{2J}{h}$, то

$$f = \frac{1{,}6\,[\sigma]_р\, l^2\left[1 - 4/3\left(\frac{a}{l}\right)^2\right]}{8EJ}, \tag{9.61}$$

откуда требуемая высота балки из условий жесткости

$$\frac{h}{l} = \frac{0{,}8\,[\sigma]_р\, l\,[1 - 4/3\,(a/l)^2]}{4Ef},$$

или $h = 0{,}912$ м.

Чтобы определить требуемую высоту балки из условия ее наименьшего сечения, нужно задаться толщиной вертикального листа.

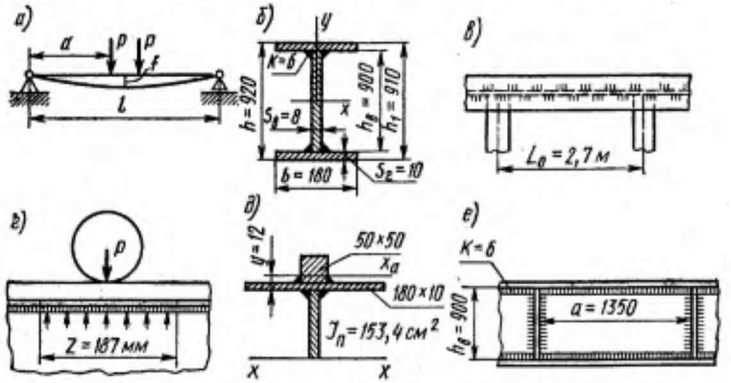


Рис. 9.19. К примеру расчета сварной балки $l = 16$ м:

а — определение высоты балки h из условий жесткости; *б* — подобранный профиль балки; *в* — расположение горизонтальных связей; *г* — учет местного влияния сосредоточенной силы; *д* — к расчету поясных швов; *е* — расстановка ребер жесткости

Можно воспользоваться рекомендуемым приближенным соотношением (9.11)

$$s_в = \sqrt{\frac{10h}{12{,}5}} = 8{,}0 \text{ мм}.$$

Примем $s_в = 8$ мм.

Требуемая высота из условия наименьшей массы определяется по формуле (9.9):

$$h = 1{,}3\sqrt{\frac{0{,}43}{8\cdot 160\cdot 10^{-3}}} = 0{,}75 \text{ м}.$$

Так как требуемая высота, найденная по формуле (9.61), больше, чем высота, найденная по формуле (9.9), то ее следует принять в расчет при подборе сечения. Высоту вертикального листа h принимаем равной 90 см, а высоту балки $h = 92$ см (рис. 9.19, *б*).

Требуемый момент инерции поперечного сечения сварной балки двутаврового профиля

$$J_{тр} = W_{тр}\frac{h}{2} = 2688\cdot 46 = 123648 \text{ см}^4,$$

Момент инерции подобранного вертикального листа размером 900×8 мм равен

$$J_в = 90^3 \frac{0{,}8}{12} = 48\,600 \text{ см}^4.$$

Требуемый момент инерции горизонтальных листов балки (поясов)

$$J_г = J_{тр} - J_в = 75\,048 \text{ см}^4.$$

Момент инерции горизонтальных листов записывается в виде

$$J_г = 2\left[J_0 + A_г\left(\frac{h_f}{2}\right)^2\right].$$

Таким образом, требуемое сечение одного пояса балки

$$A_г = J_г \Big/ \left[2\left(\frac{h_f}{2}\right)^2\right] = \frac{75\,048}{2 \cdot 45{,}5^2} = 18{,}1 \text{ см}^2.$$

Принимаем сечение горизонтального листа 180×10 мм.

Определим уточненное значение момента инерции подобранного поперечного сечения балки:

$$J = 90^3 \cdot 0{,}8/12 + 2\left(1^3 \frac{18}{12} + 1 \cdot 18 \cdot 45{,}5^2\right) = 123\,132 \text{ см}^4.$$

Наибольшее нормальное напряжение в крайнем волокне балки

$$\sigma_{max} = \frac{M}{J} y_{max} = \frac{0{,}43}{123\,132 \cdot 10^{-8}} 0{,}46 = 160{,}7 \text{ МПа}.$$

Расчетное напряжение превышает допускаемое на 0,5%, что вполне допустимо.

Определим касательное напряжение на уровне центра тяжести балки в опорном ее сечении по формуле $\tau = \frac{QS}{Js_в}$:

$$S = 18 \cdot 45{,}5 + 0{,}8 \frac{45^2}{2} = 819 + 810 = 1629 \text{ см}^3;$$

$$Q = 113{,}75 \text{ кН};$$

$$\tau = \frac{0{,}11375 \cdot 1629 \cdot 10^{-6}}{123\,132 \cdot 10^{-8} \cdot 0{,}8 \cdot 10^{-2}} = 19 \text{ МПа}.$$

Определим эквивалентные напряжения в сечении, в котором наибольший изгибающий момент $M = 0{,}43$ МН·м и поперечная сила $Q = 43{,}7$ кН. Эквивалентные напряжения вычисляются на уровне верхней кромки вертикального листа в зоне резкого изменения ширины сечения. Вычислим в этом волокне балки напряжение от момента M:

$$\sigma_1 = \frac{Mh_в}{2J} = \frac{0{,}43 \cdot 0{,}92}{2 \cdot 0{,}00123132} = 157{,}2 \text{ МПа}.$$

В этом же волокне напряжение от поперечной силы

$$\tau = \frac{QS}{Js_в} = \frac{0{,}437 \cdot 819 \cdot 10^{-6}}{0{,}00123132 \cdot 0{,}8 \cdot 10^{-2}} = 3{,}65 \text{ МПа}.$$

Здесь $S = 18 \cdot 1 \cdot 45{,}5 = 819$ см³ — статический момент площади сечения горизонтального листа относительно центра тяжести.

Эквивалентное напряжение определяется по формуле

$$\sigma_{экв} = \sqrt{\sigma_1^2 + 3\tau_1^2} = 157{,}4 \text{ МПа},$$

что меньше наибольшего нормального напряжения в крайнем волокне.

Рассмотрим, как обеспечить устойчивость балки. Если ее не закрепить в горизонтальной плоскости, то потребуется значительное уменьшение допускаемых напряжений. Поэтому следует предусмотреть закрепления от возможных перемещений верхнего пояса, например установить горизонтальные связи.

Зададимся расстоянием между закреплениями $l_0 = (10. . .20)b$, например 2,7 м (рис. 9.19, *в*). По формуле (9.27) определяем

$$\alpha = \left(\frac{270 \cdot 1}{18 \cdot 19}\right)^2 \cdot \left(1 + \frac{90 \cdot 0{,}8^3}{2 \cdot 18 \cdot 1^3}\right) = 0{,}49.$$

Пользуясь интерполяцией (см. табл. 9.3), определяем коэффициент ψ: при $\alpha = 0{,}49$ коэффициент $\psi = 1{,}79$.

Момент инерции балки относительно вертикальной оси

$$J = 0{,}8^3 \cdot \frac{90}{12} + 2 \cdot 18^3 \cdot \frac{1}{12} = 976 \text{ см}^4.$$

Коэффициент φ находим по формуле (9.26):

$$\varphi = 1{,}79\left(\frac{976}{123\,132}\right) \cdot \left(\frac{92}{270}\right)^2 \cdot 10^3 = 1{,}64.$$

Коэффициент $\varphi > 1{,}55$. Это значит, что при расчете можно принять $\varphi = 1$. Устойчивость балки при наличии закреплений на расстоянии $l_0 = 2{,}7$ м обеспечена.

Чтобы обеспечить устойчивость вертикального листа, следует приварить к нему ребра жесткости. Зададимся расстоянием между ними $a = 1{,}5h_в = 1{,}35$ м. В этом случае следует знать следующие величины:

1. Нормальное напряжение в верхнем волокне вертикального листа. Оно было определено раньше и равно $\sigma_1 = 157{,}2$ МПа.

2. Среднее касательное напряжение τ от поперечной силы. В середине пролета $Q = 43{,}7$ кН, среднее напряжение

$$\tau = \frac{Q}{h_в s_в} = \frac{0{,}0437}{0{,}9 \cdot 0{,}8 \cdot 10^{-2}} = 6{,}06 \text{ МПа}.$$

3. Местное напряжение $\sigma_м$ под сосредоточенной силой (рис. 9.19, *г*) находим по формуле (9.23), принимая $m = 1$,

$$\sigma_м = \frac{P}{s_в z}.$$

Для определения z по формуле (9.24) подсчитаем $J_п$ — момент инерции верхнего пояса с приваренным к нему рельсом. Примем сечение рельса 50×50 мм (рис. 9.19, *д*). Ордината центра тяжести сечения пояса и рельса относительно верхней кромки пояса

$$y = (-18 \cdot 1 \cdot 0{,}5 + 5 \cdot 5 \cdot 2{,}5)/(18 \cdot 1 + 5 \cdot 5) = 1{,}2 \text{ см}.$$

Положительное значение указывает на то, что центр тяжести расположен выше верхней кромки пояса.

Определим сначала момент инерции относительно оси, совпадающей с верхней кромкой пояса (эта ось параллельна центральной оси):

$$J_п = 5^3\frac{5}{3} + 1^3\frac{18}{3} = 214{,}3\ см^4.$$

Теперь найдем момент инерции относительно оси x_0, проходящей через центр тяжести сечения пояса с рельсом ($A = 43\ см^2$),

$$J_п = J_п^a - Ay^2 = 152{,}4\ см^4.$$

Вычислим условную длину:

$$z = 3{,}25\sqrt[3]{\frac{152{,}4}{0{,}68}} = 18{,}7\ см.$$

Из формулы (9.23) находим $\sigma_м$ от $P = 50$ кН:

$$\sigma_м = \frac{0{,}05 \cdot 1}{0{,}008 \cdot 0{,}187} = 33{,}4\ МПа.$$

Переходим к расчету поясных швов. Катеты верхних и нижних поясных швов примем равными $K = 6$ мм. В нижних поясных швах действуют касательные напряжения

$$\tau = \frac{QS}{0{,}7 \cdot 2 \cdot J \cdot K},$$

где $Q = 113{,}75$ Н; $S = 18 \cdot 1 \cdot 45{,}5 = 819\ см^3$; $J = 123\ 132\ см^4$. Отсюда

$$\tau = \frac{0{,}11375 \cdot 819 \cdot 10^{-6}}{0{,}00123132 \cdot 2 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}006} = 9{,}2\ МПа.$$

Несмотря на то что рабочие напряжения незначительны, по технологическим соображениям целесообразно оставить $K = 6$ мм.

В верхних поясных швах, при определении напряжений с учетом приваренного рельса, следует вычислить

$$S = 18 \cdot 1 \cdot 45{,}5 + 5 \cdot 5 \cdot 48{,}5 = 2031\ см^3.$$

Момент инерции будем считать неизменившимся, как и положение центра тяжести балки. При этом

$$\tau = \frac{0{,}11375 \cdot 2031 \cdot 10^{-6}}{0{,}00123132 \cdot 2 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}006} = 22{,}8\ МПа.$$

В верхних поясных швах к вычисленным напряжениям добавляются $\tau_р$ от сосредоточенной силы P. Как уже было установлено, длина зоны распределения сосредоточенной силы в вертикальном листе $z = 18{,}7$ см рис. 9.19, г).

Таким образом, по формуле (9.41) местное напряжение в шве ($n = 0{,}4$) при $K = 6$ мм

$$\tau_р = \frac{0{,}4 \cdot 0{,}005}{0{,}187 \cdot 2 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}006} = 12{,}7\ МПа.$$

Условное результирующее напряжение по формуле (9.42)

$$\tau_{рез} = 26{,}1\ МПа.$$

Допускаемое напряжение в поясных швах определим из соотношения $[\tau'] = 0{,}65[\sigma]_р = 104$ МПа.

Катеты швов, приваривающих ребра жесткости к поясам и стенкам, принимаем такими же, как и в поясных швах, т. е. $K = 6$ мм. Эти швы не передают рабочих напряжений и расчету на прочность не подлежат.

Контрольные вопросы к главе 9

1. Что называется балкой?
2. Какие поперечные сечения балок целесообразно применять при их изгибе в одной плоскости, например вертикальной, и в двух плоскостях?
3. На какие усилия производят расчет прочности балки?
4. Для каких сечений рекомендуется строить линии влияния балок?
5. Каким путем можно использовать линии влияния, например момента, для определения усилий от двух сосредоточенных грузов P и от нагрузки q, равномерно распределенной по длине балки?
6. Какие усилия следует найти, чтобы иметь возможность начать подбор поперечного сечения балки?
7. Что такое жесткость балки и чем она измеряется?
8. От каких факторов зависит высота изгибаемой балки и можно ли ее назначать произвольно?
9. Высота каких балок при равной жесткости и равных допускаемых напряжениях должна быть большей — стальных или алюминиевых?
10. У каких балок высота должна быть большей: из малоуглеродистой стали, у которой $[\sigma]_р = 180$ МПа, или из низколегированной с $[\sigma]_р = 300$ МПа? Какое объяснение может быть дано в обоснование этого выбора?
11. По какой формуле назначается высота балки из условия минимума веса?
12. Как влияет величина $[\sigma]_р$ при определении высоты балки из условия минимума веса?
13. Можно ли ожидать, что требуемые высоты балок, определенные из форм жесткости и минимума веса, будут близкими между собой?
14. На какой высоте балки должен остановиться проектант и почему?
15. Как произойдет подбор сечений балки, если задана ее высота?
16. Как конструируют балки переменного сечения и в чем их преимущества и технологические недостатки?
17. Какие виды напряжений следует проверить в подобранном сечении балки?
18. Какие отклонения расчетных напряжений от допускаемых являются приемлемыми и почему?
19. В каких сечениях и на каком горизонте проверяют нормальные напряжения от изгиба и по какой формуле?
20. То же, касательные напряжения и по какой формуле.
21. То же, местные напряжения от сосредоточенной силы и по какой формуле
22. В каких сечениях и на каком горизонте производят определение эквивалентных напряжений и по какой формуле?
23. От каких причин происходит потеря общей устойчивости балки и как следует предотвращать это явление?

24. По каким причинам происходит потеря местной устойчивости вертикального листа (от каких напряжений)?
25. Какие мероприятия принимаются для повышения местной устойчивости?
26. По каким формулам производят проверку местной устойчивости?
27. По каким формулам определяют напряжения от крутящего момента в балках двутаврового и коробчатого профилей?
28. Какая гипотеза лежит в основе расчета балок на изгиб с учетом пластических деформаций?
29. По какой формуле производят проверку напряжений при изгибе балок с учетом пластических деформаций?
30. Где проходит нейтральная линия поперечных сечений таврового профиля балки в момент образования в нем шарнира пластичности (напряжения во всех точках сечения равны $\sigma_т$)?
31. Какова величина допускаемого момента в балке прямоугольного поперечного сечения с высотой (W) 20 см и шириной 5 см при расчете по методу упругих деформаций и пластических деформаций ($2S$)? Коэффициент запаса равен 1,4.
32. Какие разновидности сварных соединений имеются в балках?
33. Каковы формы поясных швов при нормальном и тяжелом режимах работы балок?
34. По каким формулам определяются напряжения в поясных швах при отсутствии сосредоточенных подвижных нагрузок?
35. То же, при наличии сосредоточенных подвижных нагрузок.
36. Как определяют местные напряжения в сварных поясных швах под сосредоточенными нагрузками?
37. Каково рациональное оформление швов, приваривающих ребра жесткости?
38. Как классифицируются стыки балок?
39. Какие стыки рекомендуют в балках при статической и переменной нагрузках?
40. В каких случаях делают местные усилия балок в месте стыков?
41. Каковы профили сечений балок из штампованных и гнутых элементов?
42. Каковы технико-экономические преимущества указанных профилей по сравнению с прокатными?
43. Дать примеры изгибаемых балок со связующими и рабочими сварными точками, выполненными контактной сваркой.
44. По каким формулам определяют контактные напряжения в сварных точках балок при их работе на поперечный изгиб?
45. Какие рациональные типы стыков можно предложить для балок со сварными точками?
46. В чем особенность работы алюминиевых балок по сравнению со стальными в отношении жесткости, общей и местной устойчивости?
47. Каковы типы опорных плит балок?
48. С какой целью балка на одной опоре закрепляется неподвижно, а на другой — имеет продольную подвижность?
49. По какой формуле определяют толщину плиты по ее оси?
50. Из каких соображений назначают прочие размеры плиты?
51. Каковы технико-экономические преимущества сварных балок по сравнению с клепаными и литыми?

52. Какие виды концентраторов напряжений имеются в сварных балках?
53. Каково рациональное оформление балок со сварными соединениями при их работе под переменной нагрузкой: поясных швов, стыков, ребер жесткости, приварки дополнительных планок и т. д.?
54. Как следует конструировать сварные балки, чтобы концентраторы напряжений у сварных швов не снижали ее грузоподъемности?

ГЛАВА 10

СТОЙКИ

§ 10.1. ТИПЫ ПОПЕРЕЧНЫХ СЕЧЕНИЙ

Поперечные сечения стоек имеют различную форму. Она зависит от значения, усилий, наличия эксцентриситета, длины стойки, конструкции опорных закреплений, общей компоновки объекта. Сжатые элементы должны быть не только прочны, но и устойчивы. Поэтому поперечные сечения сжатых элементов должны обладать возможно большей жесткостью по всем направлениям.

При небольших продольных усилиях применяют стойки, имеющие сечение уголка (рис. 10.1, *а*). Однако они обладают малой жесткостью и применяются преимущественно в коротких элементах. Сечения, представленные на рис. 10.1, *б*, *в*, рациональны в отношении жесткости, но не удобны для окраски и связаны с большим количеством сварочных работ. Наиболее распространено сечение, изображенное на рис. 10.1, *г*. Уголки по длине элемента соединяют между собой прокладками, о чем будет сказано ниже. Для стоек под легкие нагрузки целесообразны трубчатые и гнутые профили (рис. 10.1, *в*, *и*, *к*) из стали толщиной 1. . .6 мм, сваренные дуговой или контактной точечной сваркой.

Для изготовления стоек, работающих при продольных усилиях до нескольких сотен кН, применяют Н-образные двутавровые профили (рис. 10.1, *д*), которые во многих случаях наиболее рациональны. Нередко используются для стоек широкополочные двутавры. Открытые швеллерные профили (рис. 10.1, *ж*, *з*) применяют, чтобы при наименьшей площади получить значительный момент инерции. Трубчатые профили (рис. 10.1, *е*, *и*, *к*) иногда используют в станинах.

Рациональные конструкции стоек, работающих при продольных усилиях, составляющих тысячи кН, приведены на рис. 10.1, *л*. . .*н*. Закрытые сечения (рис. 10.1, *о*, *п*)

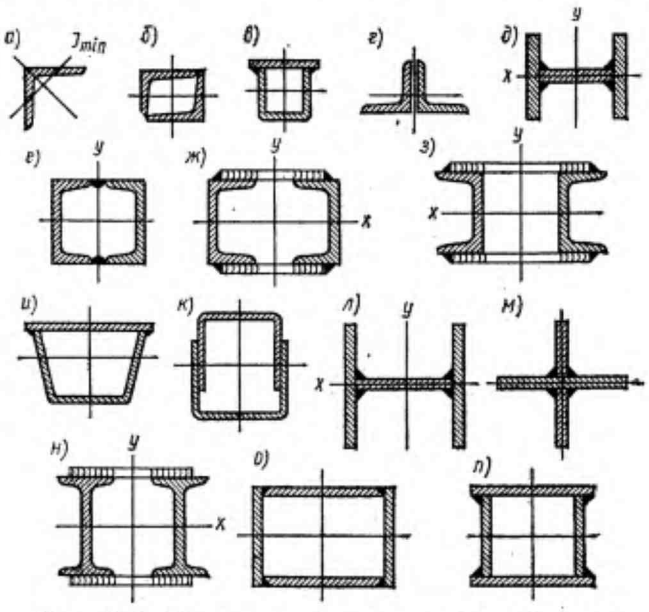


Рис. 10.1. Поперечные сечения сжатых элементов

выгодны в конструкциях различного рода рам и станин. В сжатых элементах иногда применяют цельнотянутые и сварные трубы.

§ 10.2. ПРОЧНОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ СТОЕК СО СПЛОШНЫМИ ПОПЕРЕЧНЫМИ СЕЧЕНИЯМИ ПРИ ЦЕНТРАЛЬНОМ ПРИЛОЖЕНИИ УСИЛИЙ

Расчет на прочность и устойчивость стоек, работающих при центральном сжатии, производится по формуле

$$\sigma = -\frac{N}{A} \leqslant [\sigma]_p \varphi. \qquad (10.1)$$

При введении в расчетную формулу коэффициента $\varphi < 1$ обеспечивается расчетная устойчивость сжатого элемента при продольном изгибе. Величина $\varphi < 1$ зависит от гибкости сжатого элемента.

Гибкостью λ называют отношение свободной длины элемента l к радиусу инерции r поперечного сечения гибкого элемента:

$$\lambda = \frac{l}{r}. \qquad (10.2)$$

Радиус инерции

$$r = \sqrt{\frac{J}{A}}. \qquad (10.3)$$

В направлении, где радиус имеет наименьшее значение, гибкость элемента наибольшая. Для конструкции, шарнирно закрепленной по концам (рис. 10.2, *а*), свободная длина l принимается равной длине стойки. При этом гибкость стойки определяется формулой (10.2). Примерами подобных конструкций могут служить элементы сжатых поясов ферм.

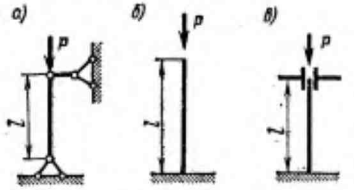


Рис. 10.2. Расчетные схемы стоек

В конструкции, имеющей один защемленный конец (рис. 10.2, *б*), гибкость

$$\lambda = \frac{2l}{r}. \qquad (10.4)$$

У стоек с защемленными концами (рис. 10.2, *в*), один из которых (нижний) неподвижен, а другой (верхний) обладает продольной подвижностью,

$$\lambda = \frac{0{,}5l}{r}. \qquad (10.5)$$

Во избежание местной потери устойчивости стенку стойки подкрепляют продольными ребрами жесткости.

Значения коэффициентов φ, согласно СНиП, определяются по табл. 10.1 в зависимости от гибкости элемента λ и от величины расчетного сопротивления R, которое принимается $R \backsim 0{,}9\sigma_т$.

Часто напряжения в сжатых элементах проверяют по преобразованной формуле

$$\sigma = -\frac{N}{A\varphi} \leqslant [\sigma]_{сж} = [\sigma]_p. \qquad (10.6)$$

При этом произведение $A\varphi$ называют приведенной площадью сжатого элемента. Трудность подбора сечения сжа-

Таблица 10.1

Коэффициенты φ продольного изгиба центрально-сжатых элементов

Гибкость элементов	Расчетные сопротивления $R \approx 0{,}9\,\sigma_т$, МПа							
	200	240	280	320	400	460	520	600
30	939	931	924	917	900	895	891	883
40	906	894	883	873	854	849	832	820
50	869	852	836	822	796	775	764	729
60	827	805	785	766	721	672	650	608
70	782	754	724	687	623	568	542	494
80	734	686	641	602	532	741	442	386
90	665	612	565	522	447	380	349	305
100	599	542	493	448	369	309	286	250
110	537	478	427	381	306	258	239	209
120	479	419	366	321	260	219	203	178
130	425	364	313	276	223	189	175	153
140	376	315	272	240	195	164	153	134
150	328	276	239	211	171	145	134	118
160	290	244	212	187	152	129	120	105
170	259	218	189	167	136	115	107	94
180	233	196	170	150	123	104	97	85
190	210	177	154	136	111	98	88	77
200	191	161	140	124	101	86	80	71

Примечание. Значения коэффициентов φ в таблице увеличены в 1000 раз.

того элемента при заданном значении силы N состоит в том, что допускаемое напряжение является функцией коэффициента φ, а последний зависит от поперечного сечения, которое еще не подобрано.

Для подбора поперечного сечения стоек пользуются методом последовательного приближения. Первоначально задаются коэффициентом $\varphi_1=0{,}5\ldots0{,}8$ в зависимости от рода конструкции. Можно принять среднее значение $\varphi_1=0{,}65$. По заданному коэффициенту определяют требуемую площадь поперечного сечения элемента, пользуясь (10.1). Затем проектируют сечение, которое обозначим A_2, находим в нем наименьшее значение момента инерции J_{min}, наименьший радиус инерции r_{min}, наибольшую гибкость $\lambda_{max}=l/r_{min}$ и коэффициент φ_2, соответствующий значению λ_{max}. Определяют напряжение в спроектированном сечении $\sigma=N/(A_2\varphi_2)$, которое должно быть близким к $[\sigma]_р$. Допустимы отклонения σ от $[\sigma]_р$ в пределах ±5%. В противном случае размеры поперечных сечений элементов

изменяют в требуемом направлении. Обычно на второй или третьей стадии подбора сечения результаты оказываются удовлетворительными.

Пример расчета (рис. 10.3). Требуется подобрать сечение стойки. Ее длина $l=8$ м, продольная сжимающая сила $P=-1100$ кН. Концы стойки закреплены шарнирно, материал — сталь ($R=240$ МПа). Здесь в первом приближении принимаем коэффициент $\varphi=0{,}6$.

Требуемая площадь поперечного сечения стойки определяется по формуле (10.1)

$$A_{тр}=1{,}100/240\cdot0{,}6=76{,}4\ \text{см}^2.$$

Коэффициент условий работы (по СНиПу) для колонны может быть принят равным 1,0. Поэтому R равно допускаемому напряжению $[\sigma]_р$.

Принимаем в качестве первого варианта, что сечение сконструировано в форме сварного двутавра из двух листов размерами 280×10 мм и одного листа размером 200×8 мм. Площадь сечения $A=72$ см².

Моменты инерции

$$J_x=\left(1^3\cdot\frac{28}{12}+28\cdot1\cdot10{,}5^2\right)+2\cdot20^3\cdot\frac{0{,}8}{12}=6711\ \text{см}^4;$$

$$J_y=\frac{2\cdot28^3\cdot1}{12}+0{,}8^3\cdot\frac{20}{12}=3659\ \text{см}^4.$$

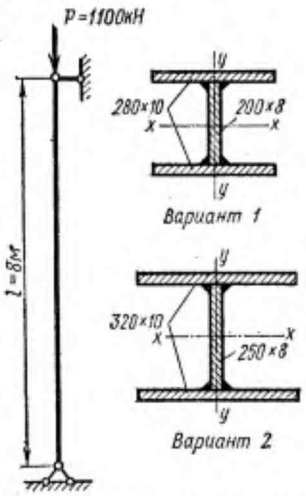


Рис. 10.3. К примеру расчета стойки на центральное сжатие

Наименьший радиус инерции

$$r_y=\frac{3659}{72}=7{,}13\ \text{см}.$$

Гибкость определяется по формуле (10.2):

$$\lambda=\frac{800}{7{,}13}=112.$$

По таблице 10.1 имеем коэффициент $\varphi=0{,}478$.
Напряжение

$$\sigma=-\frac{1{,}100}{0{,}478\cdot72\cdot10^4}=-319\ \text{МПа}.$$

Напряжение больше допустимого $[\sigma]_р$, равного 240 МПа. Увеличиваем размер так, чтобы возросла не только площадь, но и радиус инерции r_y.

Для этого берем размеры листов полок 320×10 мм и стенки 250×8 мм (вариант 2), тогда

$$A=2\cdot32+25\cdot0{,}8=84\ \text{см}^2.$$

Определяем момент инерции относительно оси

$$J_y = 2 \cdot 32^3 \cdot \frac{1}{12} + 0{,}8^3 \cdot \frac{25}{12} = 5462 \text{ см}^4.$$

Радиус инерции

$$r_y = \sqrt{\frac{5462}{82}} = 8{,}1 \text{ см}.$$

Гибкость

$$\lambda = \frac{800}{8{,}1} = 100;$$

$$\varphi = 0{,}542.$$

Затем находим напряжение сжатия:

$$\sigma = -\frac{1{,}100}{0{,}542 \cdot 84 \cdot 10^{-4}} = -241 \text{ МПа}.$$

Сечение подобрано хорошо.

§ 10.3. ПРОЧНОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ СТОЕК ПРИ ЭКСЦЕНТРИЧНО ПРИЛОЖЕННОЙ СИЛЕ

Если сила приложена к элементу эксцентрично, то следует сделать три проверки устойчивости.

Во-первых, проверить прочность от M и N по формуле (10.7):

$$\sigma = \pm \frac{M}{W} - \frac{N}{A} \leqslant [\sigma]_p. \qquad (10.7)$$

Во-вторых, проверить устойчивость от силы N в плоскости действия M, совпадающей, как правило, с направлением наибольшей жесткости сечения. Устойчивость стержней зависит от пределов текучести. С их увеличением коэффициент устойчивости φ (см. табл. 10.1) понижается. В табл. 10.2 это обстоятельство учитывается коэффициентом условной гибкости:

$$\bar{\lambda} = \lambda \sqrt{\frac{R}{E}}. \qquad (10.8)$$

С повышением $\sigma_т$ сталей растет сопротивление R, а следовательно, $\bar{\lambda}$. Рост $\bar{\lambda}$ вызывает уменьшение φ_m. Это обстоятельство позволяет использовать табл. 10.2 для сталей с различными величинами расчетных сопротивлений (пределов текучести).

Коэффициент φ заменяется коэффициентом φ_m:

$$\sigma = -\frac{N}{A\varphi_m} = [\sigma]_p. \qquad (10.9)$$

Таблица 10.2

Коэффициенты φ_m для проверки устойчивости внецентренно сжатых (сжато-изгибаемых) сплошностенных стержней в плоскости действия момента, совпадающей с плоскостью симметрии

Условная гибкость	Приведенный относительный эксцентриситет m с учетом η												
	0,1	0,25	0,50	0,75	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	8,0	10,0
1,0	925	854	778	711	653	563	484	382	307	259	225	175	142
1,5	875	804	716	747	593	507	439	347	283	240	207	163	134
2,0	813	742	653	587	536	457	397	315	260	222	193	153	125
2,5	742	672	581	526	480	410	357	287	238	204	178	144	118
3,0	667	597	580	465	425	365	320	260	217	187	166	135	112
3,5	585	527	455	408	375	325	287	233	198	172	153	125	106
4,0	505	410	394	356	330	289	256	212	181	158	140	118	98
4,5	418	380	342	310	288	257	229	192	165	146	130	110	93
5,0	354	335	295	273	253	225	205	175	150	135	120	103	88
5,5	302	280	256	240	224	200	184	158	138	124	112	95	84
6,0	258	244	223	210	198	178	166	145	128	115	105	89	79
6,5	223	213	196	185	176	160	149	132	117	106	97	83	74
7,0	194	186	173	163	157	145	136	121	108	98	91	78	64
8,0	152	246	138	133	128	117	113	100	91	83	78	68	62

Примечания: 1. Значения коэффициентов φ в таблице увеличены в 1000 раз. 2. η определяется профилем и может быть принят 1,0...1,2.

Для сплошных сечений, у которых оси материальные, т. е. пересекающие сечение, коэффициент φ определяется в зависимости от величины $\bar{\lambda}$ и $m\eta$ (табл. 10.2).

Относительный эксцентриситет

$$m = \frac{M}{W} : \frac{N}{A}, \qquad (10.10)$$

где η — коэффициент формы, может быть принят 1; 2; λ_y — гибкость стойки в плоскости действия момента; $\bar{\lambda}_y$ — условная гибкость, $\bar{\lambda}_y = \lambda_y \sqrt{\frac{R}{E}}$.

В-третьих, проверить устойчивость от силы N в плоскости наибольшей гибкости, как правило, перпендикулярной плоскости действия момента M с учетом изгибно-крутильной формы потери устойчивости.

В этом случае проверка, проводимая по формуле

$$\sigma = -\frac{N}{c\varphi_{\min} A} \leqslant [\sigma]_p \qquad (10.11)$$

показывает, что φ_{min} соответствует направлению наибольшей гибкости стойки (см. табл. 10.2);

$$c=\frac{\beta}{1+\alpha m}. \qquad (10.12)$$

Приближенно можно принять $\beta=1$, $\alpha=0{,}7$; для коробчатых профилей $\alpha=0{,}6$.

По гибкости λ_x в плоскости наибольшей гибкости, как правило, перпендикулярной моменту, определяется φ_{min}.

Необходимые площади поперечного сечения определяют также методом последовательного приближения. Если пренебречь напряжением от момента, то требуемая площадь сечения

$$A_{тр}=\frac{N}{[\sigma]_p\varphi}. \qquad (10.13)$$

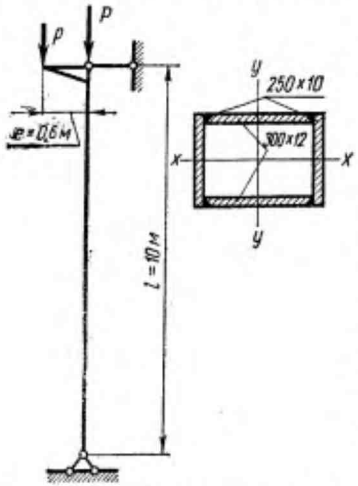


Рис. 10.4. К примеру расчета стойки на эксцентричное сжатие

Задаваясь пониженным значением $\varphi=0{,}4\ldots0{,}6$, определяют $A_{тр}$.

Конструируют поперечное сечение и производят проверку его прочности и устойчивости по формулам (10.7), (10.9), (10.11). Если напряжение отклоняется от допускаемого больше, чем на $\pm5\%$, то размеры сечения меняют и вторично проверяют его прочность и устойчивость.

Для конструкций из алюминиевых сплавов, работающих при эксцентрических нагрузках, устойчивость проверяется по формуле из СНиП.

Пример расчета (рис. 10.4). Элемент длиной $l=10$ м шарнирно закреплен по концам. Он сжат силой $P=1000$ кН, приложенной центрально, и силой $p=50$ кН, приложенной с эксцентриситетом $e=0{,}6$ м относительно оси; $[\sigma]_p=160$ МПа. Подобрать поперечное сечение элемента.

Продольная сила

$$N=P+p=-1050\text{ кН}.$$

В первом приближении, пренебрегая действием изгибающего момента, принимаем $\varphi=0{,}5$.

Требуемая площадь поперечного сечения определяется по формуле (10.13):

$$A_{тр}=\frac{1{,}05}{160}\cdot0{,}5=0{,}0131\text{ м}^2=131\text{ см}^2.$$

Рассмотрим стойку коробчатого сечения, сваренную из двух листов размером 300×12 мм и двух листов размером 250×10 мм $A=122$ см^2.

Определяем момент инерции относительно оси y:

$$J_y=2\left(30^3\cdot\frac{1{,}2}{12}+25\cdot\frac{1^3}{12}+25\cdot1\cdot15{,}5^2\right)=17\,416\text{ см}^4.$$

Радиус инерции определяем по формуле (10,3):

$$r_y=\sqrt{\frac{17\,416}{122}}=12\text{ см}.$$

Гибкость — по формуле (10.2):

$$\lambda_y=\frac{1000}{12}=83.$$

Момент сопротивления

$$W_y=\frac{17\,416}{16}=1088\text{ см}^3,$$

Момент $M_y=p\cdot e=30$ кН·м.

Суммарное максимальное напряжение от M и N определяется по формуле (10.7):

$$\sigma_{max}=-\frac{0{,}03}{1088\cdot10^{-6}}-\frac{1{,}05}{122\cdot10^{-4}}=-113{,}5\text{ МПа}.$$

Проверка удовлетворяет.

Производим вторую проверку на устойчивость в плоскости момента. Для проверки устойчивости элемента находим относительный эксцентриситет по формуле (10.8):

$$m=\frac{0{,}03\cdot122\cdot10^{-4}}{1{,}05\cdot1088\cdot10^{-6}}=0{,}32.$$

Коэффициент η, зависящий от профиля сечения, принимаем равным 1,2. Произведение $m\cdot\eta=0{,}38$. По табл. 10.2 находим значение $\varphi_m=0{,}65$.

Напряжение сжатия находим по формуле (10.7):

$$\sigma=-\frac{1{,}05}{0{,}65\cdot122\cdot10^{-4}}=-149\text{ МПа}.$$

Проверка удовлетворяет.

Производим третью проверку устойчивости элемента в направлении, перпендикулярном действию момента. Определяем момент инерции относительно оси x:

$$J_x=2\left(25^3\cdot\frac{1}{12}+30\cdot\frac{1{,}2^3}{12}+30\cdot1{,}2\cdot11{,}9^2\right)=12\,808\text{ см}^4.$$

Радиус инерции $r_x=\sqrt{\frac{12\,808}{122}}=10{,}2$ см, гибкость

$$\lambda_x=\frac{1000}{10{,}2}=98.$$

При гибкости $\lambda_x=98$ принимаем наименьшее значение коэффициента φ_{min}, соответствующее $[\sigma]_p=240$ МПа$=R$, $\varphi_{min}=0{,}6$ (см. табл. 10,2), тогда при $m=0{,}32$ $\alpha=0{,}6$. По формуле (10.12) $c=0{,}85$.

Напряжение сжатия находим по формуле (10.11):

$$\sigma = -\frac{1{,}05}{0{,}85 \cdot 0{,}6 \cdot 122 \cdot 10^{-4}} = -168 \text{ МПа}.$$

Сечение подобрано удовлетворительно, так как превышение напряжения относительно допускаемого менее 5%.

§ 10.4. РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ СТОЙКИ, ИМЕЮЩЕЙ ПОПЕРЕЧНОЕ СЕЧЕНИЕ СО СВОБОДНОЙ ОСЬЮ

Каждая из частей, образующих составное сечение стойки, называется его ветвью. В стойках с составными поперечными сечениями ветви соединяют связями. Наиболее часто в качество связи применяют соединительные планки (рис. 10.5, *а*). В сжатых элементах с составными поперечными сечениями устойчивость относительно материальной и свободной осей проверяется различными путями. Проверку устойчивости элемента относительно материальной оси, пересекающей сечение (ось *x* для конструкции, изображенной на рис. 10.5, *а*), производят так же, как и для элементов со сплошными поперечными сечениями.

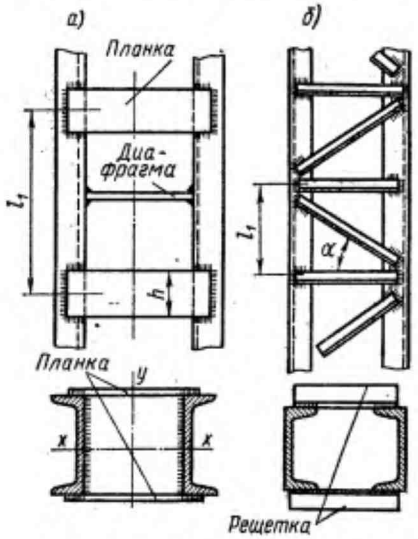


Рис. 10.5. Связи в стойках:
а — соединительные планки; *б* — соединительная решетка

При проверке устойчивости стойки относительно свободной оси, не пересекающей сечение (ось *y* на рис. 10.5, *а*), коэффициент φ находят не как функцию гибкости λ_y, а как функцию приведенной гибкости:

$$\lambda_0 = \sqrt{\lambda_y^2 + \lambda_1^2}. \qquad (10.14)$$

Величину λ_y вычисляют при допущении, что ось поперечного сечения материальна. Гибкость одной ветви на длине l

$$\lambda_1 = \frac{l_1}{r_1}. \qquad (10.15)$$

Планки рекомендуется расстанавливать таким образом, чтобы гибкость $\lambda_1 \leqslant 40$. В качестве расчетного принимают наибольшее из значений λ_x и λ_0.

На рис. 10.5, *б* показаны связи в стойках в форме соединительной решетки.

§ 10.5. СОЕДИНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

При загружении стойки силой, приложенной центрально, поперечная сила $Q=0$. В действительности в стойке могут существовать незначительные искривления оси и незначительные эксцентриситеты приложения силы. Эти обстоятельства вызывают появление поперечной силы. На основе многочисленных экспериментов, проведенных в СССР, при загружении стойки силой, действующей вдоль оси, условную поперечную силу выражают разными путями. Например, можно приближенно определять по эмпирической формуле:

$$Q_{усл} = 200\,A, \text{ Н}, \qquad (10.16)$$

где A — площадь поперечного сечения стойки, см².

Этой формулой следует пользоваться при расчете стоек из низкоуглеродистой стали, а также из сплава АМг6.

При расчете конструкций из стали повышенной прочности и сплава Д16Т целесообразно пользоваться другой условной формулой:

$$Q_{усл} = 400\,A, \text{ Н}. \qquad (10.17)$$

В конструкции, изображенной на рис. 10.6, *а*, в стойке возникает реальная поперечная сила Q, равная горизонтальной реакции:

$$Q = \frac{Pe}{l}. \qquad (10.18)$$

Когда в стойках реальные поперечные силы больше, чем условные, определенные по формулам (10.16) и (10.17), то в качестве расчетной принимают реальную поперечную силу Q.

В сжатых стойках, имеющих сплошные поперечные сечения, соединительными элементами являются сварные швы. Их конструируют непрерывными (рис. 10.6, *б*). Расчетным усилием в соединительных швах является поперечная сила: реальная, если она существует, и условная, определяемая по формуле (10.16) или (10.17). В последнем случае должно выполняться условие $Q < Q_{усл}$.

Касательные напряжения в соединительных швах определяют по формуле

$$\tau = \frac{QS}{2JK\beta}, \qquad (10.19)$$

где J — момент инерции всего сечения относительно оси; S — статический момент площади пояса (рис. 10.6, *б*, *в*).

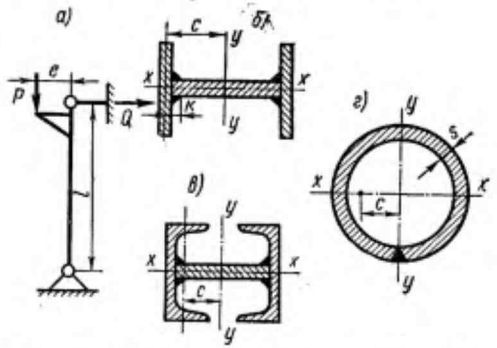


Рис. 10.6. Схема конструкции (*а*) и поперечные сечения (*б*...*г*) стоек, работающих при поперечной силе Q

Для конструкции, изображенной на рис. 10.6, *г* срезывающие напряжения в продольном шве определяются по формуле

$$\tau = \frac{QS}{2Js}, \qquad (10.20)$$

где $S = A \cdot e$; A — площадь полукольца; s — толщина стенки; e — расстояние от центра тяжести полукольца от центра трубы.

В большинстве случаев напряжения в швах от поперечной силы оказываются незначительными. Тем не менее размер катета шва следует принимать $K \geqslant 4$ мм, если наименьшая толщина соединяемых элементов больше 4 мм.

Пример расчета (см. рис. 10.3, вариант 2). Определить напряжения в соединительных элементах, где $K = 5$ мм, $A = 84$ см², материал — сталь 15ХСНД, сварка автоматическая ($\beta = 1{,}0$).

По формуле (10.17) определим

$$Q_{усл} = 400 \cdot 84 = 33\,600 \text{ Н}.$$

Момент инерции сечения

$$J = 25^3 \cdot \frac{0{,}8}{12} + 2\left(32 \cdot \frac{1^3}{12} + 32 \cdot 1 \cdot 13{,}02^2\right) = 11\,861 \text{ см}^4.$$

Определяем статический момент пояса относительно центральной оси:

$$S = 528 \text{ см}^3.$$

Напряжения в швах определяем по формуле (10.18):

$$\tau = (0{,}0336 \cdot 528 \cdot 10^{-6})/(10^{-8} \cdot 11861 \cdot 2 \cdot 0{,}5 \cdot 10^{-2}) = 22{,}7 \text{ МПа}.$$

В стойках составного поперечного сечения планки между ветвями стойки целесообразнее вваривать стыковыми швами, так как при этом число швов, требуемых для прикрепления планок, меньше, чем при других способах соединений (рис. 10.7, *а*). Однако вследствие технологических трудностей чаще применяются соединения с угловыми швами (рис. 10.7, *б*). Ширина планки h определяется при расчете на прочность. Учитывая требование жесткости, ширина планки $h \geqslant 0{,}5b$. Толщина планки должна быть $b_0/s \leqslant 50$, где b_0 — расстояние между ветвями, см.

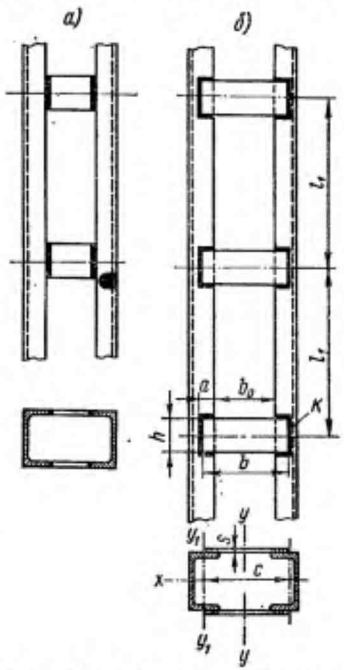


Рис. 10.7. Стойки с соединительными швами

Ветви поперечного сечения сжатого элемента дополнительно соединяют между собой диафрагмами, расположенными перпендикулярно оси элемента (см. рис. 10.5, *а*). Назначение диафрагм — препятствовать скручиванию профиля, которое может произойти из-за взаимного смещения ветвей. Число диафрагм в элементе зависит от его длины, но не должно быть меньше двух. Диафрагмы на прочность не рассчитывают. Их геометрические размеры зависят от расстояния между ветвями и от поперечного сечения стойки. Толщина диафрагмы равна толщине соединительной планки. Конструирование сжатых составных элементов только с одними диафрагмами, без соединительных планок или решетки, неприемлемо, так как при этом обе ветви стойки работают раздельно, а не как одно целое. Расчет прочности планки производится в основном на изгибающий

момент:

$$M=\frac{Ql_1}{4}, \qquad (10.21)$$

где l_1 — расстояние между осями планок; Q — поперечная сила.

Напряжение в планке, вызванное изгибающим моментом

$$\sigma=\frac{M_1}{W}\leqslant[\sigma]_p, \qquad (10.22)$$

где $W=\frac{sh^2}{6}$.

Наименьшая требуемая ширина планки определяется по формуле

$$h=\sqrt{\frac{6M}{sh^2[\sigma]_p}}. \qquad (10.23)$$

Если соединение планок со стойкой стыковое, то напряжение в швах определяется из условия

$$\sigma=\frac{6M}{sh^2}\leqslant[\sigma']_p. \qquad (10.24)$$

Если планки приварены угловыми швами, то их условия прочности определяются формулой

$$M=\frac{\tau h^2\beta K}{6}+\tau\beta Ka(h+K). \qquad (10.25)$$

Обозначения величин приведены на рис. 10.7, *б*.

Пример расчета (рис. 10.7). Произвести расстановку соединительных планок в конструкции стойки и определить их прочность.

Сечение состоит из двух швеллеров № 22а. Принимаем $[\sigma]=210$ МПа.

Наименьший момент инерции швеллера № 22а относительно собственной вертикальной оси $J_1=157{,}8$ см^4, его площадь $A=31{,}84$ см^2, радиус инерции $r_1=\sqrt{\frac{157{,}8}{31{,}84}}=2{,}2$ см.

Примем гибкость ветви $\lambda_1=40$. Расстояние между осями планок $l_1=\lambda_1 r_1=88$ см.

Поперечная сила в стойке определяется по формуле (10.16):

$$Q=400\cdot2\cdot31{,}84=25\,460\text{ Н}.$$

Изгибающий момент определяется по формуле (10.21):

$$M=\frac{0{,}02546\cdot88\cdot10^{-2}}{4}=0{,}0056\text{ МН}\cdot\text{м}.$$

Принимаем толщину планки $s=0{,}8$ см. Ее требуемая ширина определяется по формуле (10.23):

$$h=\sqrt{\frac{0{,}0056\cdot6}{210\cdot0{,}8\cdot10^{-2}}}=0{,}142\text{ м}.$$

Принимаем $h=15$ см.

Размеры горизонтальных швов: $a=5$ см, $K=0{,}8$ см. Напряжение в швах от изгиба при ручной сварке ($\beta=0{,}7$) определяется по формуле (10.25):

$$\tau=\frac{0{,}00560\cdot10^{-6}}{0{,}7\cdot0{,}8\cdot5\,(15+0{,}8)}+\frac{0{,}7\cdot0{,}8\cdot15^2}{6}=99{,}3\text{ МПа},$$

что ниже допускаемого $[\tau']=0{,}65\,[\sigma]_p=136{,}5$ МПа.

§ 10.6. СТЫКИ

Соединения стоек по длине можно производить несколькими способами. Стыковые соединения сваривают прямым швом (рис. 10.8, *а*, *б*).

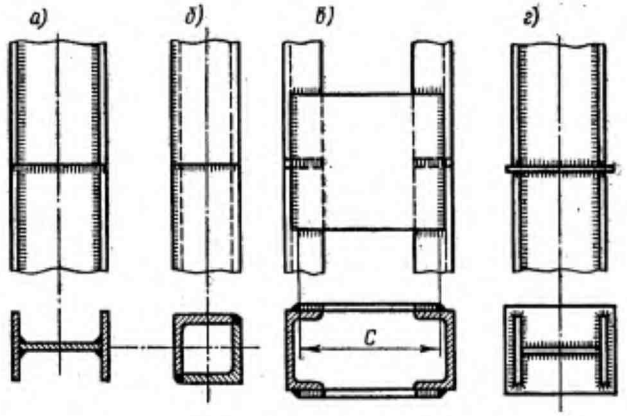


Рис. 10.8. Стыки стоек

Как правило, в таких соединениях напряжение σ существенно меньше, чем допускаемое, так как по условию устойчивости $\sigma\leqslant[\sigma]_p\varphi$ и поэтому прочность такого соединения обеспечена. Стыковые соединения, выполненные прямым швом с накладкой (рис. 10.8, *в*), применяются для стоек, имеющих составные поперечные сечения. При этом стыковые накладки служат одновременно соединительными планками. На рис. 10.8, *г* показаны соединения с помощью прокладок. Так как часть сил передается по плоскости соприкосновения двутавра с прокладкой, то допускаемые на-

пряжения при расчете сварных швов могут быть повышены до значения $[\sigma]_{сж}$. Прочность швов проверяется по формуле

$$L \geqslant \frac{N}{\beta K [\sigma]_{сж}}, \qquad (10.26)$$

где L — длина периметра швов, приваривающих сечение стойки к прокладке.

§ 10.7. БАЗЫ И ОГОЛОВКИ

Пример конструкции базы и оголовка стойки приведен на рис. 10.9. База сконструирована в форме плиты, к которой стойка приваривается тавровым соединением. Плита опирается на фундамент и крепится к нему четырьмя болтами. Для равномерного распределения давления под плитой ее делают жесткой. Для этого использованы шесть ребер жесткости, установленных в плоскостях стенки и поясов стойки. Вертикальные швы *1* нагружены слабо. Они воспринимают лишь фиктивную поперечную силу, которая, как правило, мала. Нижние швы *3* в тавровом соединении передают часть нагрузки P со стойки на плиту, в то время как другая часть нагрузки передается через плоскость соприкосновения стойки с плитой. Вследствие изгиба плиты все швы, лежащие в горизонтальной плоскости, испытывают напряжения от поперечной силы, точное определение которой представляет трудности. Швы делают непрерывными; катет шва имеет величину $K=(0{,}75\ldots1{,}0)\,s$, где s — толщина ребра жесткости.

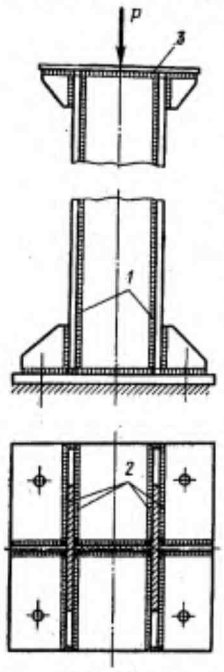


Рис. 10.9. Пример базы и оголовка стойки

Оголовок оформлен в виде верхней плиты с ребрами жесткости. Верхние швы *3* в тавровом соединении передают силу P с плиты на стойку аналогично швам *2*.

§ 10.8. ПРИМЕРЫ КОНСТРУКЦИЙ СТОЕК

Примерами стоек являются колонны промышленных зданий. Типовая колонна среднего ряда изображена на рис. 10.10. При различных размерах поперечных сечений такие колонны применяются в зданиях с пролетами 24, 30 и 36 м при разных нагрузках на кровлю и соответственно различных давлениях на фермы. Основной тип профиля колонны в верхней части — сварной двутавр. В нижней части колонна состоит из двух двутавров, соединенных диагональными связями — гнутыми уголками мелких калибров и диафрагмами. Колонны поддерживают стропильные фермы и подкрановые балки, на которые устанавливаются рельсы.

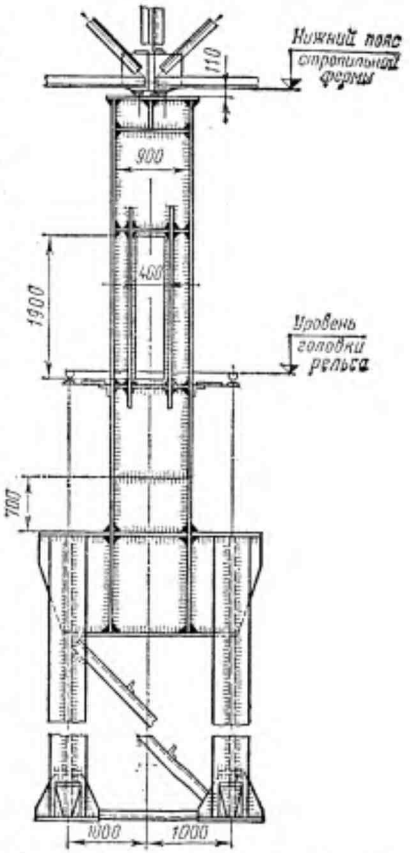


Рис. 10.10. Сварная колонна промышленного здания

В качестве стоек работают мачты электропередач, а также мачты, поддерживающие антенные устройства. Часто они представляют собой решетчатые конструкции, состоящие из вертикальных поясов, соединенных между собой связями. Негабаритные конструкции изготовляют на заводах в форме блоков. Последние транспортируют на место монтажа, где соединяют сварными швами или высокопрочными болтами.

Контрольные вопросы к главе 10

1. Какие элементы конструкции называют стойками?
2. Какие типы сечений применяют для стоек при небольших и больших усилиях?
3. Что называется гибкостью стойки? Какую размерность она имеет?
4. Что называется радиусом инерции поперечного сечения и как он определяется? Какую имеет размерность?
5. Какие допускаемые напряжения применяются при расчете стоек? Что такое коэффициент φ?

6. Зависит ли коэффициент φ от марки металла, гибкости? От каких еще параметров зависит коэффициент φ?

7. Как определяется гибкость в зависимости от опорных закреплений стоек?

8. Как проверяется напряжение в стойке при заданном усилии и сечении? Что называется приведенным сечением в сжатом элементе?

9. Как определяется допускаемое усилие сжатия в стойке заданного сечения при заданном допускаемом напряжении?

10. Как подбирают сечение в сжатой стойке при заданном усилии и допускаемом напряжении?

11. В чем состоит способ последовательного приближения подбора сечения в сжатых стойках?

12. Какие поперечные сечения допускают большее усилие при заданных размерах площадей и напряжений: прямоугольное с соотношением сторон 1/4; квадратное, круглое, трубчатое с соотношением $d_{\text{внеш}}/d_{\text{внутр}}=1{,}2$ (площадь сечения A всех стоек одинакова)?

13. Какие оси в поперечном сечении называются материальными и свободными? Перечислите проверки прочности и устойчивости стоек, нагруженных эксцентричными силами.

14. Что называется относительным эксцентриситетом m?

15. В зависимости от каких факторов делается проверка устойчивости стойки в плоскости ее наибольшей гибкости? Что такое коэффициент φ_m при расчете на эксцентричное сжатие?

16. Как производят подбор сечения стойки под действием P и M?

17. В функциях каких факторов определяется коэффициент φ_m?

18. С какой целью стойки, составленные из нескольких ветвей, соединяют между собой связями?

19. Какие виды связей применяют при конструировании стоек?

20. Что называется гибкостью ветви λ_1 и как она определяется?

21. Какие значения λ_1 рекомендуются для стоек?

22. Что такое приведенная гибкость стойки и как ее определяют в стойках со связями в виде планок?

23. То же, в виде соединительной решетки.

24. Учитывается ли фиктивная поперечная сила, если в стойке есть уже реальная поперечная сила?

25. Как рассчитывают сварные соединения на поперечную силу в стойках двутаврового и трубчатого профилей?

26. Что такое фиктивная поперечная сила Q_Φ при расчете на сжатие? Как определяется фиктивная поперечная сила в стойках из углеродистой и низколегированной стали, а также из алюминиевых сплавов?

27. Можно ли выполнять соединительные швы стоек прерывистыми? Удобно ли это в технологическом отношении? Какие размеры катетов швов могут быть рекомендованы?

28. На какие усилия рассчитывают соединительные планки в составных стойках? Как подбирают размеры соединительных планок?

29. Как конструируют базы и оголовки стоек?

ГЛАВА 11

СОПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ, РАБОТАЮЩИХ НА ИЗГИБ

§ 11.1. ТИПЫ СОПРЯЖЕНИЙ

Взаимные сопряжения элементов выполняют жесткими, частично жесткими и шарнирными. Абсолютно жестких и идеально шарнирных сопряжений не существует. Каждое соединение является частично жестким. Однако в зависимости от степени приближения соединения к абсолютно жесткому или шарнирному их условно рассматривают как жесткие или шарнирные.

Отнесение к категории жесткого, частично жесткого или шарнирного соединения зависит от способа конструктивного оформления и от общей расчетной схемы конструкции. Поясним сказанное следующими примерами:

1. Балка большого пролета с малым моментом инерции поперечного сечения относительно горизонтальной оси крепится к двум коротким стойкам, обладающим большой жесткостью в плоскости изгиба (рис. 11.1, *а*).

Элемент работает под нагрузкой P, как брус с защемленными концами.

2. Короткая и жесткая балка прикреплена к длинным стойкам, имеющим малые моменты инерции поперечных сечений в плоскости изгиба. При любой конструкции соединения брус работает как свободный, опертый по концам, так как шарнирность создается гибкостью стоек (рис. 11.1, *б*).

3. При различных соотношениях между жесткостями соединяемых элементов конструкция (рис. 11.1, *в*) работает под нагрузкой, как рама. Необходимо произвести ее статический расчет прочности. Изгибающие моменты и поперечные силы являются расчетными усилиями при проверке прочности соединения.

4. Балка (рис. 11.1, *г*), соединенная с двумя другими, имеет частично жесткие сопряжения. Величины изгибающего момента соединения зависят от соотношения между жесткостью при изгибе средней балки и жесткостью при кручении крайней. При жесткой средней балке и маложестких крайних изгибающий момент в соединении мал; при жестких крайних балках и гибкой средней он приобретает заметную величину.

5. Конструкция (рис. 11.1, *д*) представляет собой неразрезную многопролетную балку. На средних опорах образуются изгибающие моменты; сопряжения работают как

жесткие. В крайних опорах изгибающие моменты отсутствуют, сопряжения работают как шарнирные.

Раньше, чем приступить к проектированию соединения элементов, необходимо произвести его статический расчет.

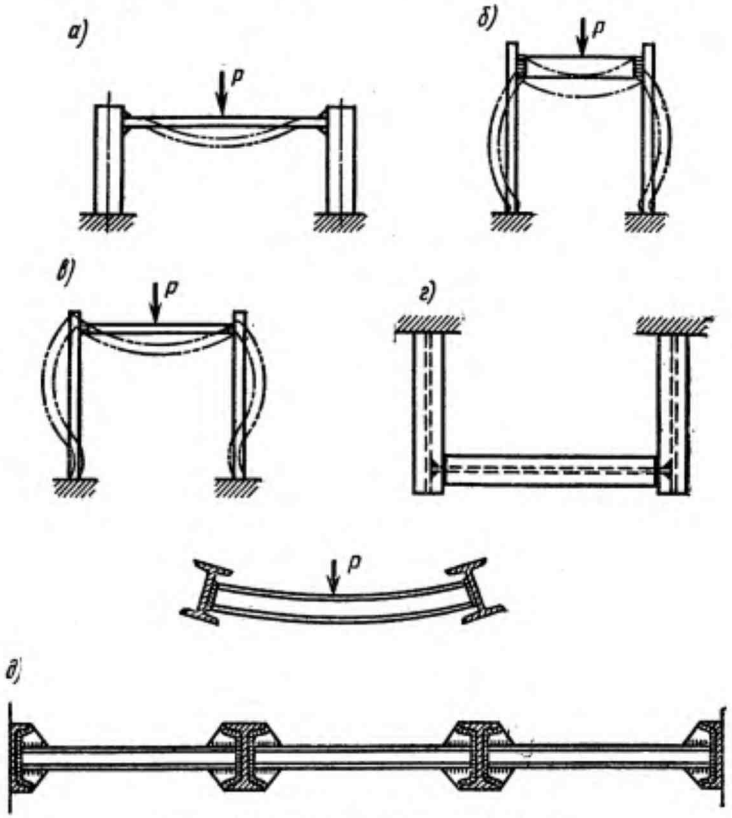


Рис. 11.1. Схема сопряжений балок:

а — балка жестко защемлена на опорах; *б* — балка имеет шарнирные опоры; *в* — жесткость соединения определяется усилиями в раме; *г* — закрепления балки приближаются к шарнирным; *д* — соединения на крайних опорах приближаются к шарнирным, на промежуточных — к жестким

В тех случаях, когда можно сделать выбор между жесткими и шарнирными сопряжениями, следует иметь в виду следующие обстоятельства:

шарнирные сопряжения проще в изготовлении; жесткие требуют наложения большого количества швов;

жесткие сопряжения повышают жесткость всей конструкции, а также ее устойчивость; например, прогиб балки, свободно опертой на опоры, значительно больше, чем той же балки, у которой концы защемлены;

жесткие сопряжения повышают степень статической неопределенности системы, что в ряде случаев оказывается целесообразным; например, в балке при шарнирных опорах и равномерной нагрузке расчетный изгибающий момент $M=ql^2/8$; в балке с защемленными концами при том же нагружении — $M=ql^2/12$.

В сварных конструкциях наиболее часто применяют сопряжения жесткого типа. Расчетным усилием для них, как правило, является изгибающий момент. Если момент не может быть определен на основе статического расчета, то сопряжение целесообразно конструировать равнопрочным основным сечением изгибаемых элементов. При этом расчетный момент

$$M=[\sigma]_p W,$$

где W — момент сопротивления поперечного сечения прикрепляемого элемента; $[\sigma]_p$ — допускаемое напряжение.

Условие прочности сопряжения записывается на основе методов сопротивления материалов следующим образом: сумма моментов внутренних сил в элементах, составляющих сопряжение, равна или больше расчетного момента M.

§ 11.2. ПРОСТЕЙШИЕ СОЕДИНЕНИЯ

Простейший тип соединения элементов, работающих на изгиб, показан на рис. 11.2, *а*. Если шов сварен с подготовкой кромок, то его поперечные сечения не отличаются от поперечного сечения полосы. Поэтому расчетные напряжения в шве определяют по формуле

$$\sigma=\frac{M}{W}\leqslant[\sigma']_p, \qquad (11.1)$$

где $W=\frac{sh^2}{6}$; s — толщина полосы; h — ее высота.

При наличии в том же соединении момента M и продольной силы $N=P$ (рис. 11.2, *б*) условие прочности определяют по формуле

$$\sigma=\frac{M}{W}+\frac{N}{A}\leqslant[\sigma']_p. \qquad (11.2)$$

Рассмотрим условия прочности прикрепления полосы, приваренной угловыми швами и работающей на момент (рис. 11.2, *в*).

В местах прикрепления напряжение от изгибающего момента

$$\frac{M}{W_c} < [\tau'], \qquad (11.3)$$

где W_c — момент сопротивления угловых швов.

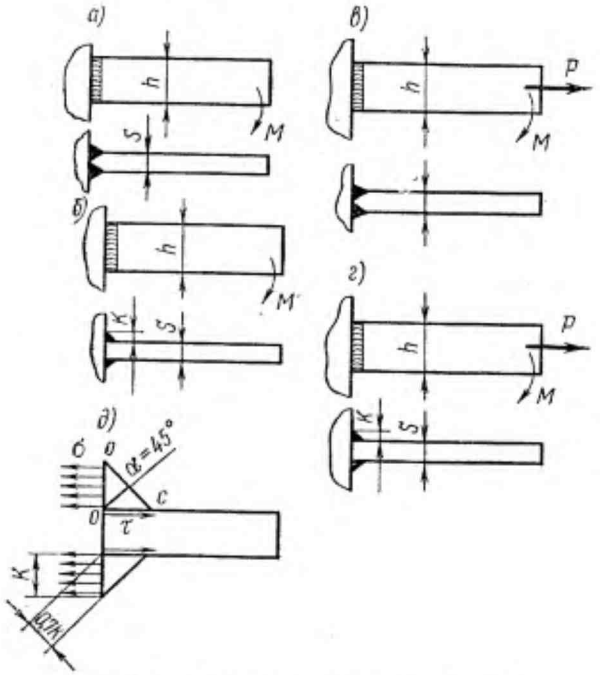


Рис. 11.2. Простейшие типы соединений:
а — с подготовкой кромок при *M*; *б* — то же, при *M* и *N*; *в* — с угловыми швами при *M*; *г* — то же, при *M* и *N*; *д* — схема работы углового шва

В плоскости 0—0 (рис. 11.2, *г*) момент сопротивления двух сварных швов высотой h и катетом K

$$W_c = 2\beta K \frac{h^2}{6}. \qquad (11.4)$$

Расчет прочности швов следует производить по напряжениям на косой плоскости. Величину этих напряжений ограничивают допускаемыми напряжениями на срез $[\tau]$. Таким образом, расчетное напряжение в швах (рис. 11.2, *в*) от момента определяют по формуле

$$\tau = \frac{M}{2\beta K \frac{h^2}{6}} \leqslant [\tau']. \qquad (11.5)$$

При действии в этом соединении момента M и продольной силы $N=P$ расчетное касательное напряжение в угловых швах (рис. 11.2, *г*)

$$\tau = \frac{M}{W_c} + \frac{N}{A_c} \leqslant [\tau'], \qquad (11.6)$$

где $[\tau']$ — допускаемое напряжение в шве при срезе; A_c — площадь сопротивления угловых швов.

§ 11.3. РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ ПО СПОСОБУ РАСЧЛЕНЕНИЯ НА СОСТАВЛЯЮЩИЕ

Принимаем, что момент M уравновешивается моментом пары сил в горизонтальных швах $M_г$ и моментом закрепления вертикального шва $M_в$ (рис. 11.3, *а*), т. е.

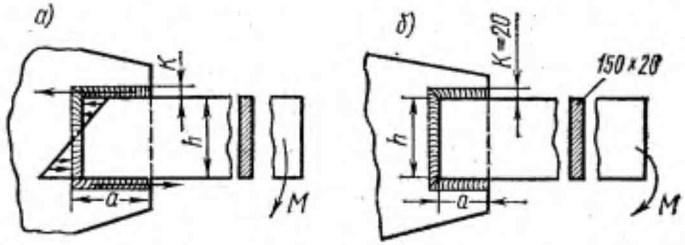


Рис. 11.3. Сварные соединения, работающие на изгиб и лежащие в плоскости *M*:
а — схема расчета по принципу расчленение на составляющие; *б* — к примеру расчета

$$M = M_г + M_в. \qquad (11.7)$$

Допустим, что швы сварены в форме равнобедренного треугольника. В горизонтальных швах образуется пара сил. Ее момент

$$M_г = \tau\beta K a (h + K). \qquad (11.8)$$

Момент в вертикальном шве вычисляется по формуле

$$M_в = \frac{\tau\beta K h^2}{6}; \qquad (11.9)$$

поэтому

$$M = \tau\beta K (h + K) + \tau \frac{\beta K h^2}{6}, \qquad (11.10)$$

откуда касательное напряжение

$$\tau = \frac{M}{\beta K a (h+K) + \beta K \frac{h^2}{6}}. \qquad (11.11)$$

Пользуясь уравнением (11.11) при конструировании соединения, легко определить требуемую длину швов a или их катет K (рис. 11.3, *б*).

§ 11.4. РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ ПО СПОСОБУ ПОЛЯРНОГО МОМЕНТА ИНЕРЦИИ

В ряде случаев, в особенности, когда соединения имеют сложную форму, как, например, на рис. 11.4, *а*, и расчленение их на составляющие затруднено, расчет прочности

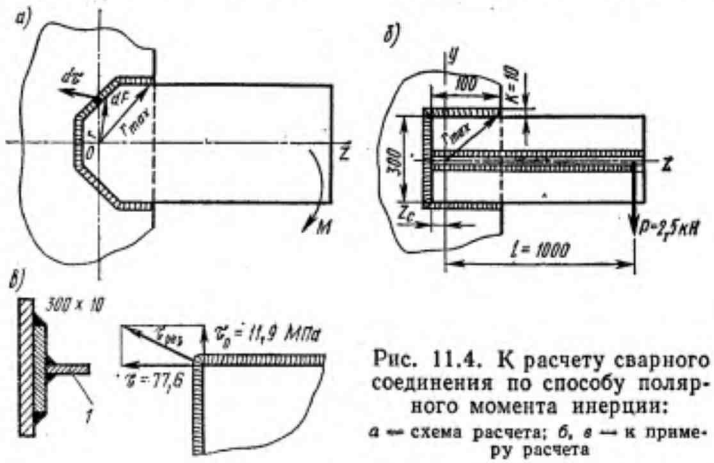


Рис. 11.4. К расчету сварного соединения по способу полярного момента инерции:
а — схема расчета; *б*, *в* — к примеру расчета

целесообразно производить по способу полярного момента инерции. Примем в качестве рабочей гипотезы, что под действием момента соединение стремится повернуться относительно своего центра тяжести O. В элементе dF шва образуется реактивная сила

$$d\Gamma = \tau\, dF. \qquad (11.12)$$

Момент реактивного усилия для всего соединения относительно точки O

$$M = \int \tau\, dF r. \qquad (11.13)$$

Так как величина перемещения точек шва пропорциональна расстояниям r до центра вращения, то и напряжения τ определяются как линейные функции от r.

Из соотношения

$$\frac{\tau}{\tau_1} = \frac{r}{1} \qquad (11.14)$$

находим

$$\tau = \tau_1 r, \qquad (11.15)$$

где τ_1 — напряжение на условном расстоянии от центра, равном единице. Так как τ_1 есть величина, не зависящая от r, то она может быть вынесена за знак интеграла:

$$M = \tau_1 \int_F r^2\, dF. \qquad (11.16)$$

Интеграл представляет собой величину полярного момента инерции сварных швов относительно точки O:

$$\int_F r^2\, dA = J_p. \qquad (11.17)$$

Полярный момент инерции равен сумме двух осевых:

$$J_p = J_z + J_y.$$

Находим напряжение

$$\tau_1 = \frac{M}{J_p}; \qquad (11.18)$$

наибольшее напряжение

$$\tau_{max} = \frac{M}{J_p} r_{max}. \qquad (11.19)$$

Пример расчёта (рис. 11.4, *б*). Определить напряжение в конструкции соединения, приведенного на рисунке ($\beta = 0{,}7$).

Определяем координаты центра тяжести швов соединения тавра с листом. Абсцисса центра тяжести периметра швов относительно вертикальной кромки полосы

$$z_c = \frac{2 \cdot 10 \cdot 5 - 30 \cdot 1 \cdot 0{,}5}{2 \cdot 10 \cdot 1 + 30 \cdot 1} = 1{,}7 \text{ см}.$$

Момент инерции швов относительно оси z

$$J_z = \frac{30^3 \cdot 1}{12} + 2\left(\frac{10 \cdot 1^3}{12} + 10 \cdot 1 \cdot 15{,}5^2\right) = 7056 \text{ см}^4.$$

Момент инерции швов относительно оси y

$$J_y = 2\left[\frac{10^3 \cdot 1}{12} + 10 \cdot 1\,(5 - 1{,}7)^2\right] + \frac{30 \cdot 1^3}{12} + 30\,(1{,}7 + 0{,}5)^2 = 532 \text{ см}^4.$$

Полярный момент инерции периметра швов

$$J_p = 7056 + 532 = 7588 \text{ см}^4.$$

Расчетный полярный момент инерции швов (с учетом разрушения по плоскости, совпадающей с биссектрисой прямого угла) при $\beta=0{,}7$

$$J'_p = 0{,}7 \cdot 7588 = 5311 \text{ см}^4.$$

Изгибающий момент $M=0{,}025 \cdot 1=0{,}025$ МН·м.

Наибольшее расстояние r_{max} показано на рис. 11.4, *б*.

Наибольшее напряжение от момента в точке с абсциссой, равной (100—17)=83 мм и ординатой (150+10)=160 мм,

$$\tau_{max} = \frac{0{,}025\sqrt{0{,}16^2 + 0{,}083^2}}{5{,}311 \cdot 10^{-5}} = 84{,}7 \text{ МПа}.$$

Среднее напряжение в вертикальном шве от $Q=P=25$ кН

$$\tau_Q = \frac{0{,}025}{0{,}3 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}01} = 11{,}9 \text{ МПа}.$$

Так как в зоне τ_{max} напряжение $\tau_Q=0$, то проверки результирующих напряжений не требуется.

Определим напряжения в том же соединении методом расчленения на два горизонтальных шва и один вертикальный по формуле (11.11):

$$\tau = \frac{0{,}025}{0{,}7 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}1\,(0{,}3 + 0{,}01) + 0{,}7 \cdot 0{,}01 \cdot \frac{0{,}3^2}{6}} = 77{,}6 \text{ МПа}.$$

По этому способу расчета напряжение τ постоянно по длине горизонтальных швов.

Расчетное результирующее напряжение в пересечении горизонтального и вертикального швов (рис. 11.4, *в*)

$$\tau_p = \sqrt{77{,}6^2 + 11{,}9^2} = 78{,}5 \text{ МПа}.$$

Расчет прочности по способу полярного момента инерции дает большее значение напряжения, поэтому вычисление напряжения по этому способу обеспечивает больший запас прочности.

§ 11.5. РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ ПО СПОСОБУ ОСЕВОГО МОМЕНТА ИНЕРЦИИ

В основе этого способа лежит допущение, что напряжения в швах пропорциональны деформациям в основном металле (рис. 11.5) и, следовательно, возрастают в линейной зависимости от расстояния от точки до нейтральной оси элемента. Реактивное усилие в элементе

$$d\Gamma = \tau\, dF. \qquad (11.20)$$

Реактивный момент в элементе определяется по формуле

$$dM = d\Gamma y. \qquad (11.21)$$

Полный момент внутренних сил, уравновешивающий момент,

$$M = \int d\Gamma y = \int \tau\, dF y. \qquad (11.22)$$

Принимаем, что напряжения представляют собой линейную функцию расстояния до оси. При этом

$$\frac{\tau}{\tau_1} = \frac{y}{1},$$

где τ_1 — напряжение на расстоянии, равном единице, от оси z.

Тогда

$$M = \tau_1 \int_F y^2\, dF. \qquad (11.23)$$

Интеграл выражает величину момента инерции периметра швов относительно оси z.

Наибольшее напряжение

$$\tau_{max} = \frac{My}{J_z} \leqslant [\tau']. \qquad (11.24)$$

Расчет прочности по способу осевого момента инерции незначительно отличается от первого способа расчленения соединения на составляющие.

Наиболее часто все же применяют первый способ, в особенности при конструировании соединений с учетом заданных усилий. Второй способ используют для определения

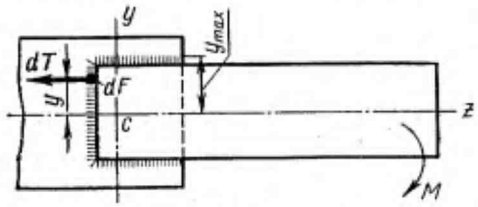


Рис. 11.5. К примеру расчета сварного соединения по способу осевого момента инерции

расчетных напряжений в заданных конструкциях соединений. Третий способ подобен первому. Его используют в тех случаях, когда расчленение соединений затруднительно.

§ 11.6. СОПРЯЖЕНИЯ БАЛОК РАЗЛИЧНЫХ ПРОФИЛЕЙ

При дальнейшем рассмотрении прочности сопряжений, работающих на изгиб, будем предполагать, что угловые швы имеют форму равнобедренного треугольника. При этом расчет прочности шва при ручной сварке производится

всегда на срез по плоскости, совпадающей с биссектрисой прямого угла и равной βKa (K — катет шва, a — его длина).

Определим напряжения в сварном сечении, прикрепляющем балку прямоугольного поперечного сечения, работающую на изгиб (рис. 11.6, *а*).

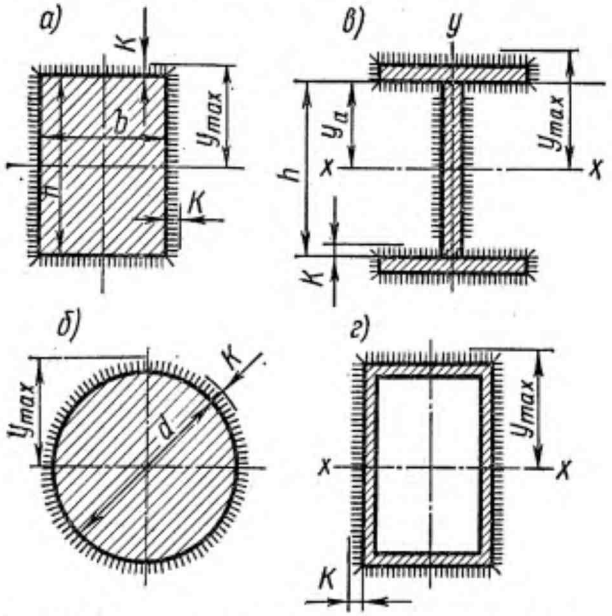


Рис. 11.6. Сварные соединения элементов, обваренных угловыми швами по периметрам

Соединение сконструировано с угловыми швами, обваривающими периметр. Такое соединение удобно при повороте конструкции и при наложении швов в нижнем и вертикальном положениях.

Нормальные напряжения в балке вызывают касательные напряжения τ в швах:

$$\tau = \frac{M}{W_c} \leqslant [\tau']. \qquad (11.35)$$

Момент сопротивления

$$W_c = \frac{J_c}{y_{max}}, \qquad (11.36)$$

где J_c — расчетный момент инерции периметра швов. Он определяется умножением момента инерции сечения швов

на коэффициент $\beta=0{,}7$ с учетом возможного разрушения швов по наименьшему сечению:

$$J_c = 0{,}7\left[Kb\left(\frac{h+K}{2}\right)^2 \cdot 2 + \frac{K^3 b}{12}\cdot 2 + \frac{(h+2K)^3}{12}K\cdot 2\right];$$

$$y_{max} = \frac{h}{2} + K \qquad (11.37)$$

(h и K указаны на рис. 11.6, *в*).

Для круглого поперечного сечения (рис. 11.6, *б*)

$$J_c = 0{,}7\left[\frac{\pi(d+2K)^4}{64} - \frac{\pi d^4}{64}\right];$$

$$y_{max} = \frac{d}{2} + K. \qquad (11.38)$$

Если элемент работает при сложном сопротивлении — изгибающем моменте M и продольной силе N, то суммарное напряжение в соединении

$$\tau = \pm \frac{M}{J_c} y_{max} + \frac{N}{A_c}, \qquad (11.39)$$

где A_c — расчетная площадь швов, определяемая с учетом возможного разрушения по наименьшему сечению умножением площади поперечного сечения на β:

$$A_c = \beta K L, \qquad (11.40)$$

где L — длина периметра швов.

Расчет прочности прикрепления произвольных профилей двутавровых, коробчатых (рис. 11.6, *в*, *г*, тавровых и т. п.) при помощи швов производится так же, как в случаях, рассмотренных выше, на основе формулы

$$\tau = \frac{M}{J_c} y_{max} \leqslant [\tau'], \qquad (11.41)$$

где J_c — расчетный момент инерции периметра швов, который определяют умножением величины момента инерции сечения контура шириной K на β.

Если элементы нагружены поперечными нагрузками, то в них возникают изгибающие моменты M и поперечные силы Q. Напряжения в сварных швах от Q определяют при следующих допущениях:

поперечная сила воспринимается только вертикальными швами;

распределение напряжений по длине вертикальных швов равномерно.

Таким образом, среднее напряжение в шве от поперечной силы

$$\tau_0 = \frac{Q}{A_в}, \qquad (11.42)$$

где $A_в$ — расчетная площадь вертикальных швов.

На уровне верхней кромки вертикального листа в швах следует проверить результирующие напряжения от M и Q.

Напряжение от момента

$$\tau = \frac{M}{J_c} y_a, \qquad (11.43)$$

где y_a — расстояние от оси, проходящей через центр тяжести сечения, до горизонтальной верхней кромки (рис. 11.6, *в*).

В частном случае $y_0 = h/2$

$$\tau_0 = \frac{Q}{2\beta K h}. \qquad (11.44)$$

Результирующее напряжение

$$\tau_{рез} = \sqrt{\tau^2 + \tau_Q^2} \leqslant [\tau']. \qquad (11.45)$$

Практика расчетов показывает, что проверка прочности по формуле (11.41) является решающей.

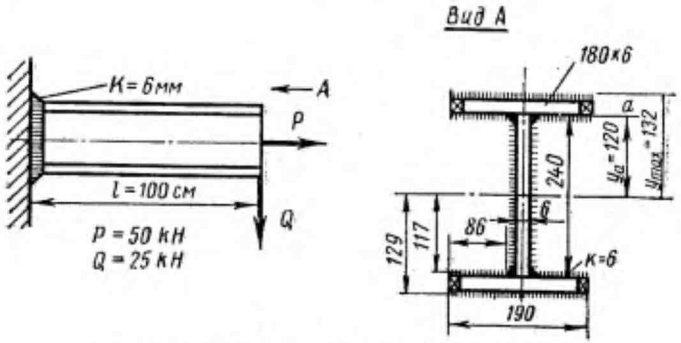


Рис. 11.7. Расчет соединений на M и N

Пример расчёта (рис. 11.7). Консольная балка двутаврового профиля прикреплена сваркой по периметру угловыми швами с катетом $K=6$ мм; продольная сила $P=N=50$ кН; поперечная сила $Q=25$ кН; $\beta=0{,}7$.

Момент инерции периметра угловых швов

$$J = \frac{2 \cdot 24^3 \cdot 0{,}6}{12} + 2\left(\frac{19 \cdot 0{,}6^3}{12} + 19 \cdot 0{,}6 \cdot 12{,}9^2\right) +$$

$$+ 2\left(\frac{2 \cdot 8{,}6 \cdot 0{,}6^3}{12} + 2 \cdot 8{,}6 \cdot 0{,}6 \cdot 11{,}7^2\right) = 8000 \text{ см}^4.$$

Расчетный момент инерции угловых швов с учетом разрушения по опасной плоскости $J_c = 0{,}7 \cdot 8000 = 5600$ см^4. Ордината $y_a = 12$ см. Площадь всего периметра угловых швов составляет $A = 2 \cdot 24 \cdot 0{,}6 + 2 \cdot 19 \cdot 0{,}6 + 4 \cdot 8{,}6 \cdot 0{,}6 = 72{,}2$ см^2.

Расчетная площадь с учетом разрушения по опасной плоскости

$$A_c = 0{,}7 \cdot 72{,}2 = 50{,}5 \text{ см}^2.$$

Расчетная площадь вертикальных швов с учетом разрушения по опасной плоскости

$$A_в = 2 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}6 \cdot 24 = 20{,}2 \text{ см}^2.$$

Напряжения от изгиба на крайней кромке вертикального листа

$$\tau = (25 \cdot 10^{-3} / 5600 \cdot 10^{-8}) \cdot 0{,}12 = 53{,}6 \text{ МПа}.$$

Напряжения от продольной силы в угловых швах соединения

$$\tau_N = \frac{N}{A_c} = \frac{50 \cdot 10^{-3}}{50{,}5 \cdot 10^{-4}} = 9{,}9 \text{ МПа}.$$

Суммарное напряжение от изгиба и продольной силы в зоне $y_a = 120$ мм составляет $53{,}6 + 9{,}9 = 63{,}5$ МПа.

Среднее касательное напряжение в вертикальных швах соединения

$$\tau_Q = \frac{Q}{A_в} = \frac{25 \cdot 10^{-3}}{20{,}2 \cdot 10^{-4}} = 12{,}4 \text{ МПа}.$$

Результирующее напряжение в зоне $y_a = 120$ мм

$$\tau_{рез} = \sqrt{63{,}5^2 + 12{,}4^2} = 64{,}7 \text{ МПа}.$$

Максимальное напряжение в зоне от изгиба, где $y_{max} = 132$ мм,

$$\tau = \frac{M}{J_c} y_{max} = \frac{0{,}02500}{5600 \cdot 10^{-8}} \cdot 13{,}2 \cdot 10^{-2} = 58{,}8 \text{ МПа}.$$

Суммарное напряжение от изгиба и продольной силы в зоне, где $y_{max} = 132$ мм,

$$\tau_\Sigma = 58{,}8 + 9{,}9 = 68{,}7 \text{ МПа},$$

что меньше допускаемого, принимаемого для стали Ст2 равным $0{,}6 \cdot 140 = 84$ МПа.

Таким образом, решающим для определения прочности консольной балки является проверка на изгибающий момент совместно с продольной силой без учета поперечной силы в волокнах швов, наиболее удаленных от центра тяжести сечения.

§ 11.7. СОПРЯЖЕНИЯ БАЛОК МЕЖДУ СОБОЙ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ УСИЛЕНИЯМИ

Конструкции сопряжений двутавровых балок показаны на рис. 11.8, *а*. . .*в*.

Иногда балки небольшой высоты прикрепляют к высокой путем обваривания периметра поперечного сечения угловыми швами. В этом случае рационально усилить сопряжение

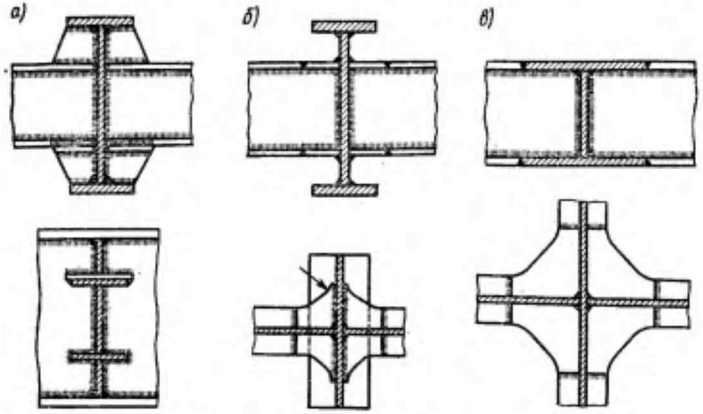


Рис. 11.8. Сопряжения сварных балок между собой:
а — высота балок разная, косынки вертикальные; *б* — то же, косынки горизонтальные; *в* — высота балок одинаковая

балок косынками трапецеидального очертания, как указано на рис. 11.8, *а*. Толщины косынок и вертикальной стенки, как правило, равны. Остальные размеры устанавливаются с учетом требований жесткости сопряжения и прочности швов прикрепления. Подобная конструкция может быть рекомендована при статических нагрузках.

На рис. 11.8, *а* предусмотрена опора в виде столика. Подобного рода опоры очень облегчают монтаж балок.

Основную долю момента воспринимают швы, обваривающие поперечное сечение по периметру:

$$M_{\text{п}} = \frac{\tau J_c}{y_{\max}}, \qquad (11.46)$$

где $M_{\text{п}}$ — момент инерции периметра шва с учетом его ширины, равной β; $y_{\max}$ — расстояние от оси прикрепляемой балки до крайнего волокна шва.

Косынки повышают дополнительно прочность и надежность соединения.

Для сварного сопряжения балок, воспринимающих переменные нагрузки, более рационален тип конструкции, приведенный на рис. 11.8, *б*. Увеличением длины шва можно значительно повысить несущую способность конструкции, а устройством выкружек с радиусом r достигнуть снижения

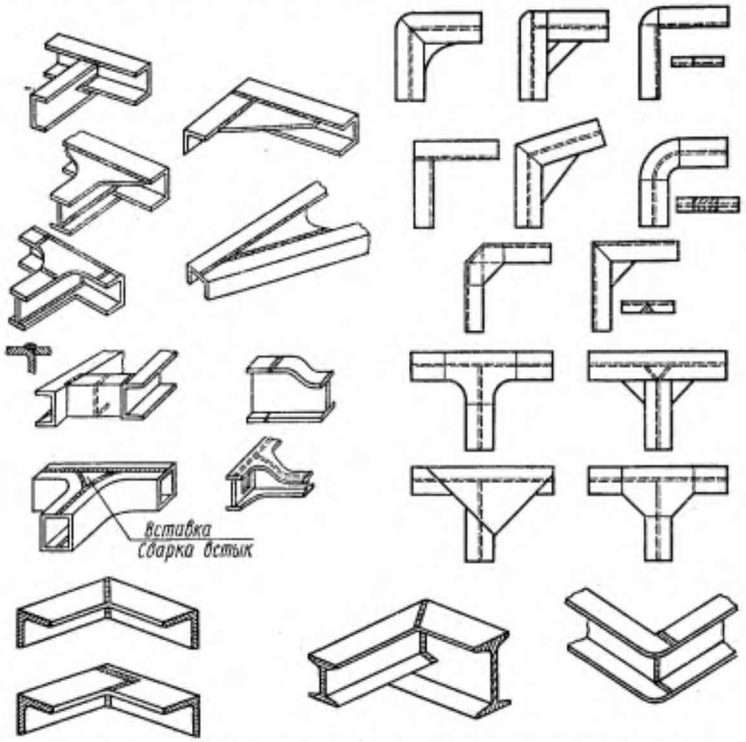


Рис. 11.9. Сопряжения балок различного профиля

концентраторов напряжений. Стыковые соединения в ответственных конструкциях необходимо механически обрабатывать.

Для сопряжений балок одинаковой высоты, воспринимающих статические и переменные нагрузки, может быть рекомендована конфигурация (рис. 11.8, *в*), которая обеспечивает жесткость, устраняет концентраторы напряжений и позволяет накладывать швы в требуемом количестве.

На рис. 11.9 показаны примеры сопряжений швеллеров, двутавров и уголков. Узлы сконструированы с применением фигурной резки. Во всех случаях при работе балки на изгиб

соблюдается следующее условие прочности: момент внутренних сил относительно центра тяжести сопряжения равен расчетному моменту.

§ 11.8. СОПРЯЖЕНИЯ БАЛОК СО СТОЙКАМИ

На рис. 11.10 приведено сварное сопряжение балки со стойкой. Это сопряжение выполнено обвариванием периметра поперечного сечения балки и установкой уголка и является типовым.

На рис. 11.11 приведен пример сопряжения балки двутаврового профиля со стойкой при помощи коротких вер-

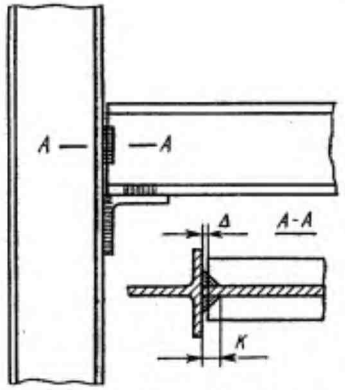


Рис. 11.10. Сопряжения шарнирного типа балки со стойкой в металлическом каркасе здания

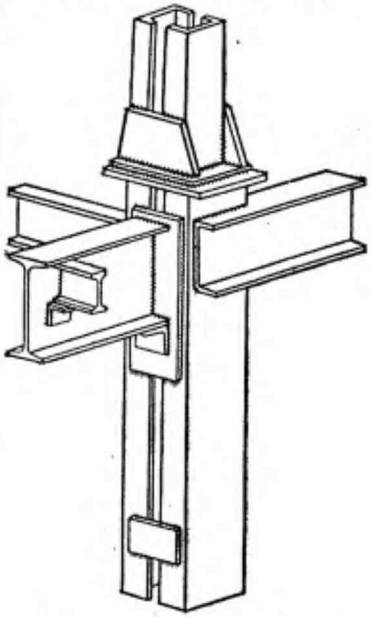


Рис. 11.11. Жесткие сопряжения балок со стойкой, применяемых в промышленном здании

тикальных швов. Между полками балки и стойки оставлены небольшие зазоры $\Delta=1...2$ мм, которые обеспечивают шарнирность соединения. При этом волокна, наиболее удаленные от нейтральной оси, могут свободно деформироваться. Расчет прочности такого вида сопряжений производится на поперечную силу. Эти сопряжения иногда применяют в США. В СССР их используют редко ввиду недостаточно надежного характера работы.

Пример сварного кронштейна приведен на рис. 11.12.

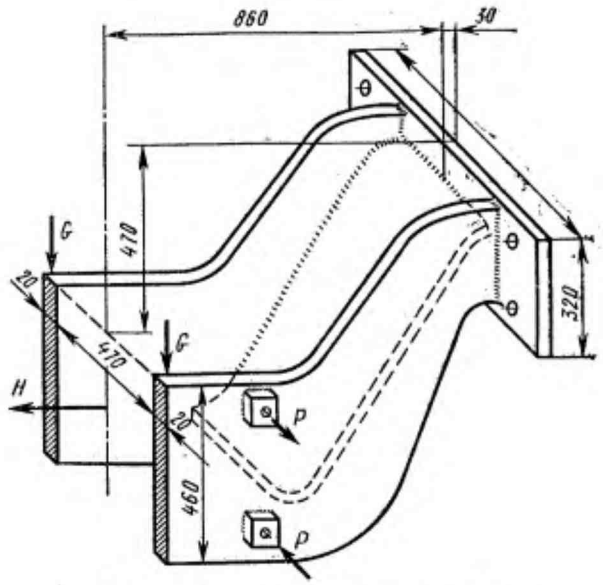


Рис. 11.12. К примеру кронштейна

§ 11.9. ТОЧЕЧНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ, РАБОТАЮЩИЕ НА ИЗГИБ

Пример точечного соединения, работающего на момент M, приведен на рис. 11.13, *а*. Изгибающий момент уравновешивается парой сил Г, возникающих в точках.

Усилие в каждой точке

$$\Gamma=\frac{M}{h}. \qquad (11.47)$$

Напряжение в точке

$$\tau=\frac{4M}{h\pi d^2}\leqslant[\tau'], \qquad (11.48)$$

где h — расстояние между центрами точек; d — диаметр точки.

Пример точечного соединения, работающего на поперечный изгиб, приведен на рис. 11.13, *б*, *в*.

В соединениях возникают: изгибающий момент $M=Pl$; поперечная сила $Q=P$.

Напряжение в точке, наиболее удаленной от нейтральной оси, определяется по формуле

$$\tau_{max}=\frac{4M}{\pi d^2\sum y^2}y_{max}. \qquad (11.49)$$

Напряжение, вызванное поперечной силой,

$$\tau_Q=\frac{4Q}{n\pi d^2}, \qquad (11.50)$$

где n — количество точек в вертикальном ряду.

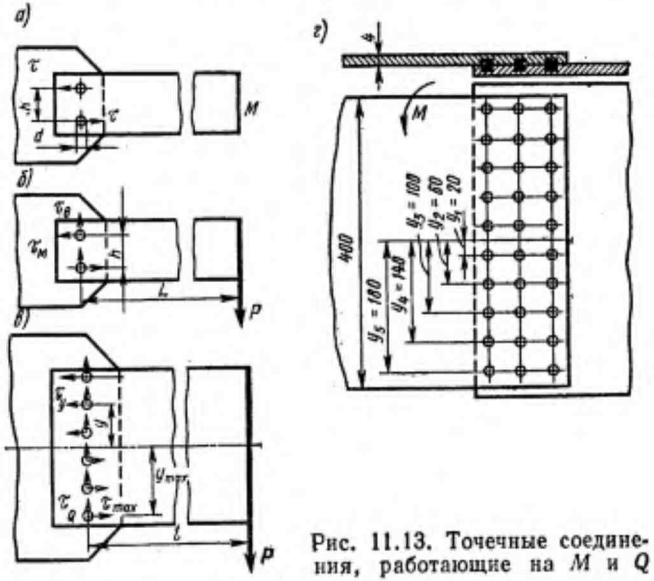


Рис. 11.13. Точечные соединения, работающие на M и Q

При наличии i-го количества вертикальных рядов точек от изгиба будет

$$\tau_{max}=\frac{4M}{i\pi d^2\sum y^2}y_{max}, \qquad (11.51)$$

а напряжение от Q

$$\tau_Q=\frac{4Q}{in\pi d^2}y_{max}. \qquad (11.52)$$

Результирующее напряжение должно быть

$$\tau_{рез}=\sqrt{\tau_{max}^2+\tau_Q^2}\leqslant[\tau']. \qquad (11.53)$$

Пример расчёта (рис. 11.13, *г*). Требуется сконструировать прикрепление листа сечением 400×4 мм, равнопрочное по изгибу основному элементу. Нагрузка статическая.

Изгибающий момент, воспринимаемый основным листом,

$$M=[\sigma]_p W=\frac{[\sigma]_p sh^2}{6}=\frac{[\sigma]_p\cdot0{,}4\cdot40^2}{6}=[\sigma]_p106{,}6\ \text{кН}\cdot\text{см}.$$

Диаметр сварной точки принимаем

$$d=1{,}5s+5=11\ \text{мм}.$$

Расстояние между односрезными точками при толщине листа 4 мм принимаем равным 4 см. Расстояние точек до оси $y_1=2$ см, $y_2=6$ см, $y_3=10$ см, $y_4=14$ см, $y_5=18$ см.

Из формулы (11.51) находим i, заменяя τ_{max} через $[\tau']$, где принимаем $[\tau']=0{,}5\,[\sigma]_p$:

$$\sum y^2=(2^2+6^2+10^2+14^2+18^2)\cdot2=1320\ \text{см}^2.$$

Определим число рядов:

$$i=\frac{4\cdot106{,}6\,[\sigma]_p\cdot18}{3{,}14\cdot1{,}1^2\cdot1320\cdot0{,}5\,[\sigma]_p}=2{,}98.$$

Принимаем три вертикальных ряда точек.

Контрольные вопросы к главе 11

1. Какие соединения условно называют жесткими и какие шарнирными?
2. В чем преимущество жестких и шарнирных сопряжений?
3. Как определяют напряжения от изгиба в месте прикрепления элемента, если соединение втавр выполнено с подготовкой кромок?
4. То же, без подготовки кромок обваривании угловыми швами.
5. Как производят расчет на прочность такого соединения при действии изгибающего момента и продольной силы?
6. В чем заключается расчет прочности соединения на момент, лежащий в плоскости соединения, способом расчленения на составляющие?
7. То же, по полярному моменту инерции.
8. Как определяют результирующие напряжения от M и Q по способу полярного момента инерции?
9. То же, по способу осевого момента инерции.
10. Какой из двух способов наиболее удобен при подборе требуемых размеров швов соединения, работающего на изгиб?
11. Как определяют напряжения в соединении этого вида при действии M и N?
12. Почему при определении J_c для угловых швов нормального очертания умножают величину L периметра на коэффициент β?
13. Приведите примеры конструкций сопряжений балок двутаврового профиля.
14. Как определяют напряжения τ_{max} в сопряжениях двутаврого профиля от момента? В какой зоне определяют результирующие напряжения от M и Q?
15. То же, швеллерного профиля.
16. То же, углового профиля.
17. Для чего при взаимных сопряжениях балок разной высоты предусматривают вертикальные ребра?

18. То же, горизонтальные.
19. Как оформляют сопряжения балок разного профиля: двутавров с уголками, уголков с швеллерами и т. д.?
20. Как оформляют нежесткие сопряжения балок со стойками?
21. Как рассчитывают на прочность вертикальные швы в указанных сопряжениях?
22. Как оформляют жесткие сопряжения балок со стойками?
23. Как проверяют прочность жестких сопряжений на момент?
24. Как проверяют точечные соединения при работе на момент?
25. То же, на момент и продольную силу, действующие совместно.
26. То же, на момент и поперечную силу, действующие совместно.

ГЛАВА 12

РЕШЕТЧАТЫЕ КОНСТРУКЦИИ (ФЕРМЫ)

§ 12.1. ТИПЫ ФЕРМ. ВЫБОР ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ

Многочисленные эксперименты показали, что усилия в стержнях реальных ферм близки по значению к усилиям, вычисленным в предположении шарнирности узлов ферм. Обоснованное экспериментами допущение, что узлы ферм шарнирны, значительно облегчает проектанту задачу конструирования и расчета. Проектирование фермы начинается с выбора рациональной ее системы. Система ферм зависит от назначения, общей компоновки конструкции, требований эксплуатации. Очень часто рациональная система определяется на основе опытного проектирования и сравнения нескольких вариантов. Из них выбирают ту конструкцию, которая отличается наименьшей массой и трудоемкостью при изготовлении.

Для стропильных ферм больших пролетов (рис. 12.1, *а*) желательны системы, имеющие стойки. Длины панелей этих ферм составляют $d=1{,}5\ldots3{,}0$ м, отношение высоты к пролету $h/l=1/10\ldots1/14$. Пример крановой фермы приведен на рис. 12.1, *б*. Длина панели верхнего пояса, по которой перемещается тележка с грузом, принимается $d=1{,}5\ldots2{,}5$ м; отношение высоты к пролету $h/l=1/12\ldots1/18$ (это отношение определяется требованиями жесткости и компактности конструкции). Чем больше h/l, тем меньше прогибы ферм под нагрузкой, но зато больше должна быть и высота цеха. Исходя из указанных соображений в настоящее время крановые конструкции, как правило, изготовляются в форме балочных систем, хотя раньше применение ферм для кранов было распространено в промышленности.

Панели мостовых ферм значительно больше, чем крановых и стропильных. Мостовые фермы должны обладать большой жесткостью, поэтому часто принимают отношение $h/l=1{,}6\ldots1/10$.

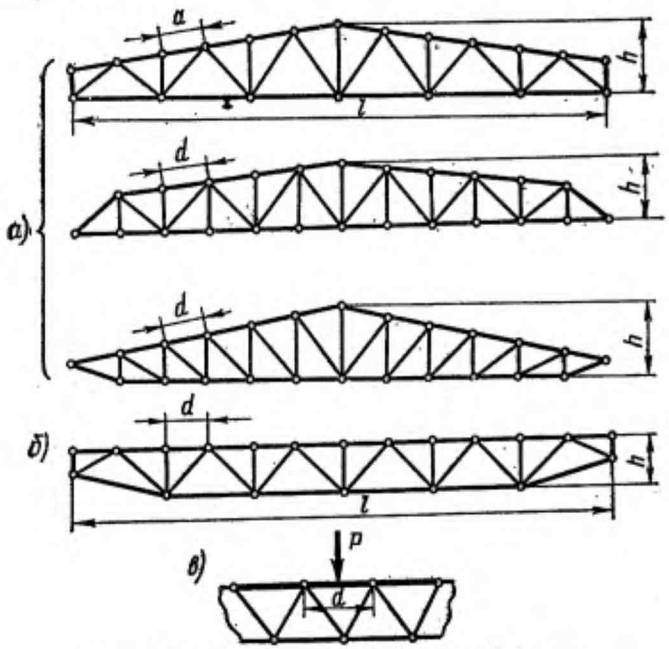


Рис. 12.1. Схемы ферм больших пролетов:
а — стропильные; *б* — крановые; *в* — схема загружения панели пояса сосредоточенной силой

Приведенные системы ферм показаны в виде плоских систем. В действительности конструкции состоят всегда из двух или более ферм, связанных между собой элементами, называемыми связями.

§ 12.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗОК И УСИЛИЙ СТЕРЖНЕЙ

В строительных и мостовых конструкциях в большинстве случаев нагрузки приложены в узлах ферм, т. е. в местах соединения стержней. Значения полезной нагрузки указываются в техническом задании на проектирование. Определение продольных сил в элементах ферм от нагрузок, приложенных в узлах, производится методами строительной механики. Целесообразно отдельно определять про-

дольные силы от собственного веса, полезной нагрузки и суммарные расчетные силы.

Допустим, что нагрузки приложены не в узлах ферм, а по длине панели (рис. 12.1, *в*), тогда их следует разложить по узлам и обычным путем определять продольные силы в стержнях фермы. В нагруженных панелях помимо продольных сил действуют поперечные силы Q и изгибающие моменты M, которые определяются при рассмотрении нагруженного пояса фермы в качестве балки. Допустим, что панель (стержень пояса) нагружена сосредоточенной силой P, приложенной к ее середине. Учитывая, что пояс представляет собой неразрезанную балку, при расчете часто приближенно принимают расчетный момент:

$$M = \frac{Pd}{6}. \qquad (12.1)$$

Расчетная поперечная сила

$$Q = \frac{P}{2}. \qquad (12.2)$$

После вычисления продольных сил N и моментов M расчетное напряжение определяется по формуле

$$\sigma = \pm \frac{M}{J} y_{max} + \frac{N}{A} \leqslant [\sigma]_p, \qquad (12.3)$$

где J — момент инерции поперечного сечения пояса относительно горизонтальной оси; A — площадь сечения пояса; y_{max} — расстояние от центра тяжести сечения до крайнего волокна, в котором напряжение имеет тот же знак, что и сила N.

В сжатом поясе производится проверка на продольный изгиб (см. гл. 11). После определения требуемых размеров поперечных сечений приближенным методом иногда производят вторичный расчет пояса с учетом изгибающего момента, вычисленного уточненным методом. При этом пояс рассматривается как многоопорная балка. Точность практических расчетов достаточна при условии рассмотрения пояса в качестве трехпролетной неразрезанной балки.

§ 12.3. ПОПЕРЕЧНЫЕ СЕЧЕНИЯ СТЕРЖНЕЙ

Стержни должны обладать достаточной прочностью и жесткостью. Превышение расчетного напряжения относительно допускаемого ни в коем случае не должно быть более 5%. Стержни следует конструировать по возможности эко-

Таблица 12.1

Предельная гибкость λ элементов ферм

Наименование элементов конструкций	Сжатые стержни	Растянутые стержни	
		при статических нагрузках	при динамических нагрузках
Пояса, опорные раскосы	120	400	150...250
Прочие элементы ферм	150	400	350
Основные колонны	120	—	—
Второстепенные колонны, связи между ними	150	300	300
Остальные элементы связей	200	400	400

номично, т. е. расчетные напряжения должны быть близкими к допускаемым. Однако поперечные сечения стержней, нагруженных небольшими продольными силами, часто подбирают из условий жесткости. Поэтому в этих стержнях напряжения могут быть незначительными.

Наибольшее значение гибкости λ стержней стальных ферм промышленных сооружений (см. гл. 11), как правило, не должно превышать данных табл. 12.1. В фермах гибкость ограничивается не только в сжатых, но и в растянутых стержнях, чтобы устранить их провисание при весьма большой гибкости и вибрации при динамических нагрузках. Сортамент применяемого металла должен быть по возможности однообразным, т. е. следует иметь как можно меньшее количество разнородных элементов (позиций). Это упрощает и удешевляет изготовление ферм на заводе. Фермы в значительном большинстве случаев конструируются из прокатных профильных элементов. Лучше применять гнутые элементы, имеющие меньшую толщину и повышенную жесткость по сравнению с прокатными.

При конструировании ферм следует стремиться сократить объем сварочных работ, располагать швы в элементах симметрично и обеспечивать удобное выполнение сварки как на заводе, так и на монтажной площадке.

Рассмотрим определение сечений сжатых поясов. Типы поперечных сечений сжатых поясов, имеющие наибольшее распространение, приведены на рис. 12.2, *а*. . .*и*. Сечения в форме уголков (рис. 12.2, *а*) применяют в слабонагруженных фермах или в нерабочих элементах. Сечения в форме двух уголков (рис. 12.2, *б*) часто проектируют в фермах с небольшими усилиями (в легких стропильных фермах, мач-

тах). Замкнутые сечения (рис. 12.2, *в*) целесообразны в тонкостенных конструкциях и в конструкциях, где требуется повышенное сопротивление кручению. Сечения, показанные на рис. 12.2, *г*, *д*, встречаются в крановых фермах, в которых верхние пояса помимо силы сжатия испытывают изгибающие моменты. Двустенчатые конструкции (рис. 12.2, *е*, *ж*) применяют при средних и больших усилиях (в стропильных и крановых фермах). Конструкцию, представленную на рис. 12.2, *з*, применяют в мостовых пролетных строениях.

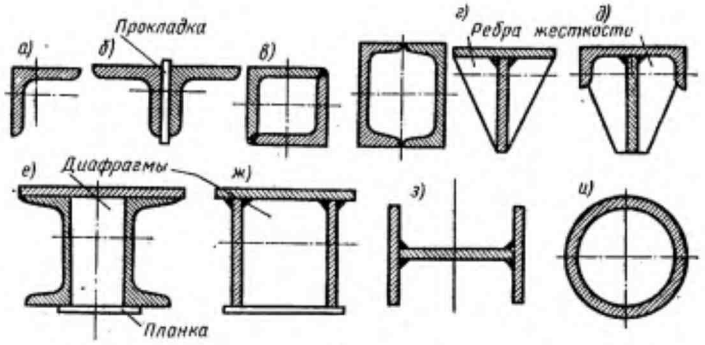


Рис. 12.2. Поперечные сечения сжатых поясов ферм

Трубчатая конструкция (рис. 12.2, *и*) рациональна в отношении требований прочности и экономичности. Возможно применение и других видов сечений.

Требуемая площадь сжатого элемента пояса при отсутствии момента определяется из условия

$$A_{тр}=\frac{N}{[\sigma]_р\,\varphi}. \qquad (12.4)$$

При подборе сечения следует предварительно задаться коэффициентом $\varphi=0{,}5\ldots0{,}7$. Свободную длину стержня выбирают в зависимости от конструкции сооружения. Например, горизонтальная жесткость стропильных ферм обеспечивается постановкой горизонтальных связей. Свободную длину пояса принимают равной расстоянию между центрами узлов. Подбор сечения сжатого пояса производят так же, как и сжатой стойки (см. гл. 11).

В стержнях, сечения которых приведены на рис. 12.2, соединительные швы конструируют непрерывными. Их выполняют обычно автоматической сваркой под флюсом, при этом катет шва принимают равным (0,4. . .0,6) толщины листа. Нередко $K=4\ldots5$ мм.

Для повышения устойчивости элементов применяют соединительные планки, диафрагмы, ребра жесткости, расположенные в плоскости, перпендикулярной оси элемента. В фермах с большими пролетами, рассчитанными на тяжелые нагрузки, например в мостовых, поперечные сечения пояса иногда меняются от панели к панели, и площадь сечения подбирают отдельно для каждой панели. Так поступают, когда длина панелей, например, превышает 6. . .8 м. В крановых фермах средней грузоподъемности, в стропильных и других типах ферм сечения поясов обычно неизменны по длине. Следует иметь в виду, что перемена сечения не должна значительно изменять положения центра тяжести, так как это вызывает образование эксцентриситета усилий. Последнее приводит к появлению добавочного изгибающего момента в узле. Это иногда вынуждает отказаться от изменения сечения и сохранять его одинаковым по всей длине фермы. Допустимый эксцентриситет зависит от наибольшей высоты соединяемых элементов, т. е. $e\geqslant0{,}02h$. Если e превышает указанный предел, то необходимо учесть дополнительные напряжения от изгибающего момента.

Конструирование поперечных сечений растянутых поясов значительно проще, чем сжатых, так как в этом случае допускаемое напряжение в металле не зависит от гибкости элементов. Требуемая площадь поперечного сечения при растяжении определяется по формуле

$$A_{тр}=\frac{N}{[\sigma]_р}. \qquad (12.5)$$

Типы поперечных сечений растянутых поясов приведены на рис. 12.3, *а*. . .*ж*. Тип сечения нижнего пояса обычно соответствует типу сечения верхнего пояса.

Соединительные швы стержней, изображенных на рис. 12.3, *в*. . .*ж*,— нерабочие, катеты швов $K=4\ldots5$ мм, швы непрерывные.

Типы поперечных сечений раскосов и стоек приведены на рис. 12.4, *а*. . .*ж*.

Уголки (рис. 12.4, *а*) применяют тогда, когда элементы поясов сконструированы тоже из уголков, парные уголки с зазором (рис. 12.4, *б*) применяют весьма часто в фермах, работающих под легкими и средними нагрузками. Сечения элементов, приведенные на рис. 12.4, *в*. . .*ж*, могут быть рекомендованы для стержней, если пояса имеют двустенчатые сечения. Целесообразно применение труб.

В растянутых раскосах и стойках требуемая площадь поперечного сечения элемента определяется по формуле

(12.5), а в сжатых раскосах и стойках — по формуле (12.4) (предварительно принимают $\varphi=0{,}4\ldots0{,}7$). Порядок подбора сечений аналогичен описанному в гл. 11.

При определении гибкости раскосов и стоек в плоскости, перпендикулярной ферме, свободную длину l принимают

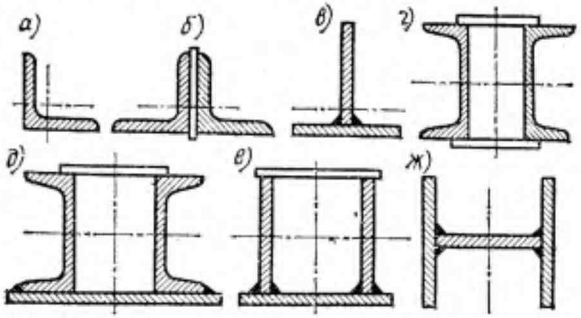


Рис. 12.3. Поперечные сечения растянутых поясов ферм

равной теоретической, т. е. расстоянию между центрами узлов. При вычислении гибкости этих элементов в плоскости фермы допускается принимать расчетную длину, рав-

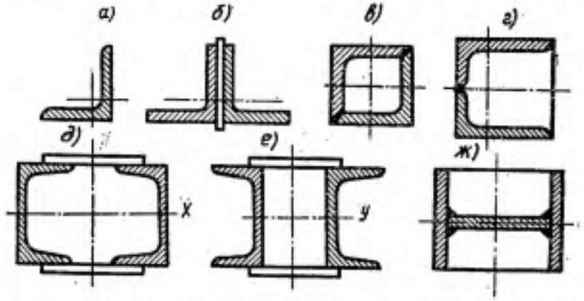


Рис. 12.4. Поперечные сечения сжатых и растянутых раскосов и стоек

ную 0,8 от теоретической длины раскосов и стоек; это объясняется наличием частичного защемления элементов в узлах.

Если поперечное сечение элемента состоит из двух ветвей, как показано на рис. 12.4, *д*, *е*, то определяют гибкости: λ_x — относительно оси x; λ_y — относительно оси y; $\lambda_0=\sqrt{\lambda_y^2+\lambda_1^2}$, где λ_1 — гибкость ветви, которую для сжатых элементов берут не больше 40 (см. гл. 10).

Для определения коэффициента φ берется наибольшая из найденных величин. Площадь сечения каждого раскоса и стойки подбирают независимо от других. Однако нередко, для того чтобы сохранить однообразие сортамента для ряда элементов решетки фермы (раскосы, стойки), площадь сечения принимают одинаковой.

Прочность соединительных швов в растянутых элементах не рассчитывается, в сжатых элементах (рис. 12.4, *в*, *г*, *ж*) она проверяется как указано в гл. 10. По условиям технологии катет шва, как правило, в обоих случаях назначается размером 4. . .5 мм, но не менее $0{,}3s$. Расстояние между планками берут таким, чтобы гибкость ветви растянутого элемента $\lambda\leqslant200$. Расчет прочности соединительных планок (рис. 12.4, *д*, *е*) в сжатых элементах производится так же, как планок на сжатых стойках (см. гл. 10).

§ 12.4. УЗЛЫ ФЕРМ

Условия рационального конструирования узлов ферм следующие: геометрические оси соединяемых стержней должны пересекаться в одной точке — центре узла; должна быть обеспечена возможность наложения швов, прочно прикрепляющих раскосы и стойки к поясам в удобном для производства сварочных работ положении, не должно быть скученных швов.

Требуемая длина угловых швов, закрепляющих стержень в узле, вычисляется по формуле

$$L=\frac{N}{\beta K[\tau']}, \qquad (12.6)$$

где N — продольное усилие в стержне; $[\tau']$ — допускаемое касательное напряжение сварного шва.

Если присоединяемый элемент является уголком, то расчет сварных швов производят, как указано в § 3.3. Результаты подбора сечений элементов представляют в виде таблицы:

Таблица

Схема подбора сечений элементов

Элементы	Усилие N, кН	Состав сечения	Площадь A, см²	Наименьший радиус инерции r_{min}, см	Длина l, см	Наибольшая гибкость λ_{max}	Коэффициент φ	Расчетное напряжение σ, МПа

В узлах часто применяют косынки, имеющие форму надставок, вставок, прокладок, накладок.

Узлы без косынок наиболее просты при изготовлении. Их следует применять, если могут быть соблюдены все правила рационального конструирования узловых соединений.

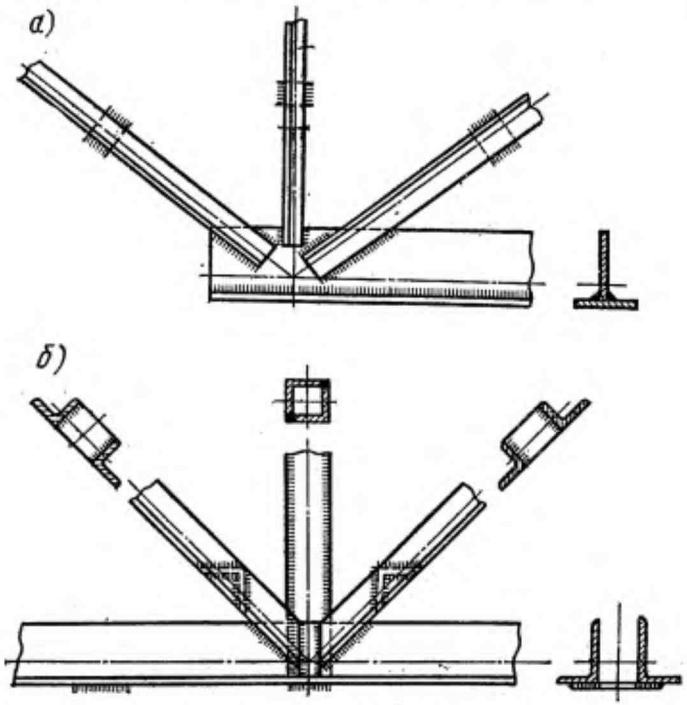


Рис. 12.5. Узлы без косынок:
а — сечение пояса одностенчатое; *б* — сечение пояса двустенчатое

Пример конструкции узла фермы без косынок с одностенчатым профилем пояса приведен на рис. 12.5, *а*. На рис. 12.5, *б* приведена конструкция, у которой нижний пояс и раскосы имеют двустенчатые сечения, что позволяет весьма компактно соединять элементы в узле.

Примеры конструкций узлов с надставками приведены на рис. 12.6, *а*, *б*. Соединения надставок — стыковые или тавровые. Расчет прочности швов, прикрепляющих раскосы к надставкам, производится обычным путем. Требуемая длина швов прикрепления раскоса определяется по формуле (12.6). Приближенный расчет швов, прикрепляющих надставку к поясу, может быть получен с учетом следующих соображений. В узле сумма проекций сил на вертикальную ось $\sum Y=0$. Следовательно, усилия в раскосах должны быть разных знаков. Допустим, что элемент N_1 растянут, а элемент N_2 сжат (рис. 12.6, *а*). Поскольку сумма проекций на

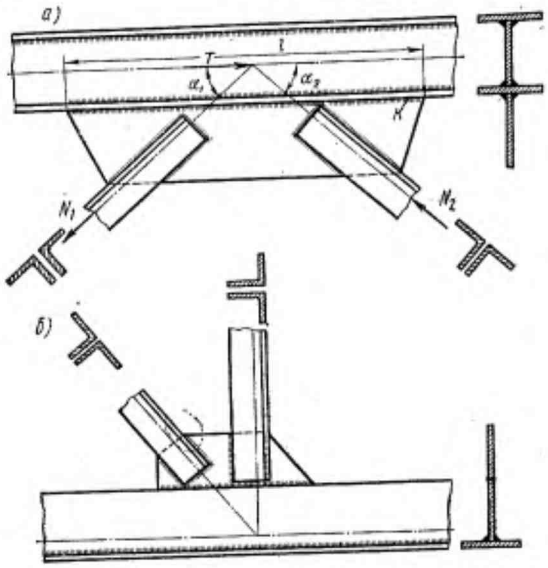


Рис. 12.6. Узлы фермы с надставками:
а — сечение пояса двутавровое; *б* — сечение пояса тавровое

горизонтальную ось $\sum X=0$, приходим к выводу, что горизонтальные швы, прикрепляющие надставку, срезаются силой

$$\Gamma = N_1 \cos\alpha_1 + N_2 \cos\alpha_2. \qquad (12.7)$$

Напряжение в шве

$$\tau = \frac{\Gamma}{\beta K l \cdot 2}, \qquad (12.8)$$

где l — длина надставки.

Как правило, напряжения τ невелики.

Пример узла со вставками показан на рис. 12.7. Вертикальные листы поясов обрабатываются и вместо них вставляются фигурные листы, размеры которых позволяют обеспечить прочное прикрепление раскосов и стоек. Вставку к вертикальному листу можно прикрепить как прямыми,

так и косыми стыковыми швами. Узлы со вставками применяют в фермах, работающих под переменными нагрузками.

Узлы с прокладками применяют, когда сечения стержней ферм состоят из парных элементов — уголков, расставленных с зазором относительно друг друга (рис. 12.8, *а*). Прочность швов, приваривающих прокладки к поясам, определяется так же, как и прочность швов, прикрепляющих надставки.

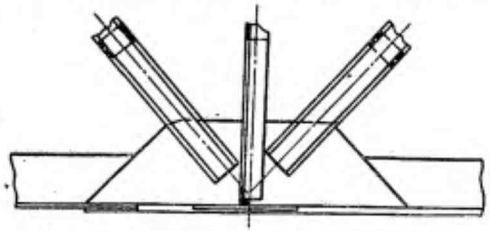


Рис. 12.7. Узел фермы со вставками

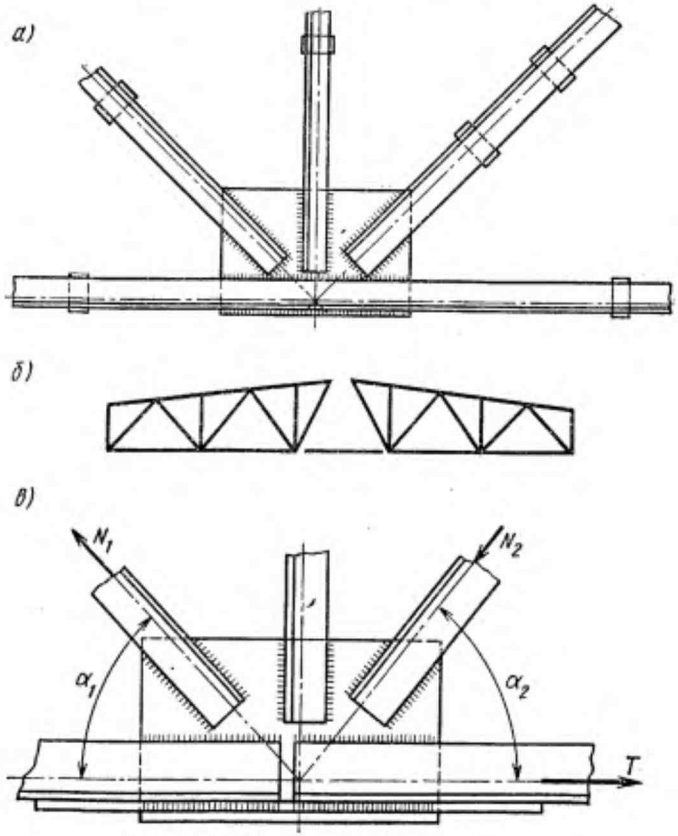


Рис. 12.8. Узлы с прокладками;
а — без разрыва пояса; *б*, *в* — с разрывом пояса

Усилие, сдвигающее прокладку относительно пояса, определяется по формуле (12.7), где N_1 и N_2 — усилия в раскосах; α_1 и α_2 — углы наклона раскосов (рис. 12.8, *в*).

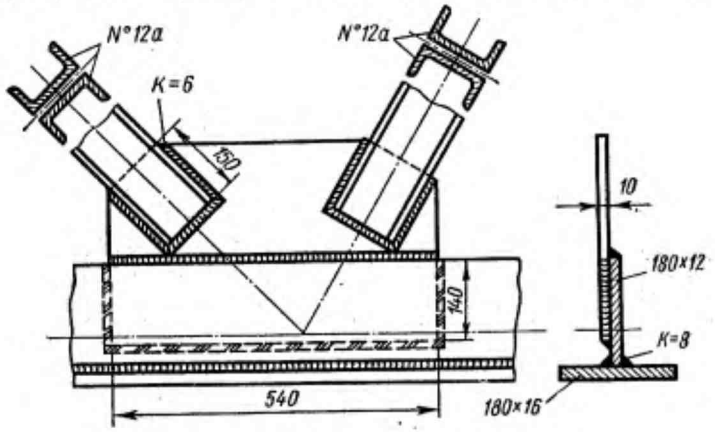


Рис. 12.9. Узел с накладкой

Распределение усилий происходит неравномерно. Усилие со стороны обушка уголка $T_1=0{,}7T$, с противоположной стороны — $T_2=0{,}3T$.

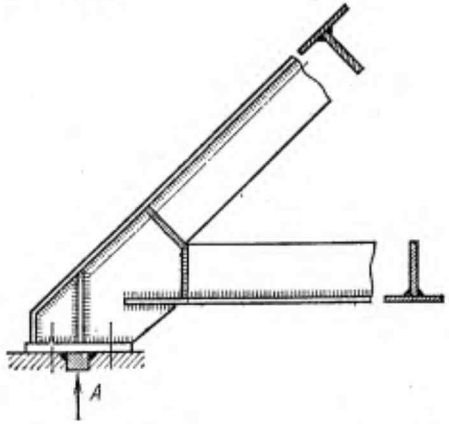


Рис. 12.10. Пример опорного узла стропильной фермы

Определив T_1 и T_2, находим напряжение в швах.

В тех случаях, когда ферму изготовляют на заводе не целиком, а отдельными частями (рис. 12.8, *б*), узлы с прокладками иногда используют для соединения элементов фермы, как это видно на рис. 12.8, *в*.

Пример узла с накладкой приведен на рис. 12.9. Узлы с накладками в настоящее время проектируют редко. В большинстве случаев они могут быть лишь в легких фермах.

Конструкции опорных узлов зависят от назначения ферм и устройств креплений. При конструировании опорных узлов ферм необходимо соблюдать следующие условия: направление реакции A должно проходить через центр опорного узла; сжатый пояс должен проходить над опорой, не прерываясь; узел должен обладать достаточной жесткостью (рис. 12.10).

§ 12.5. СПЕЦИАЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ФЕРМ

Монтажный узел башни Ленинградского телецентра высотой $h=316$ м изображен на рис. 12.11. Соединение элементов решетки с вертикальными поясами башни выполнено

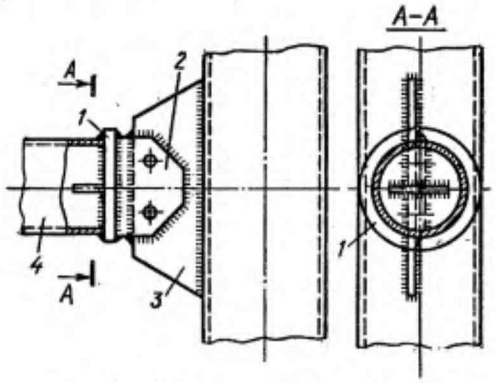


Рис. 12.11. Монтажный узел башни телецентра

с помощью торцевых листов *1*. Последние приваривали к трубам *4* и косынкам *2* на заводе угловыми швами. Косынки *3* приваривали к вертикальным поясам также в заводских условиях. Монтажные соединения выполнены на болтах с последующей обваркой.

На рис. 12.12 изображены различные узлы трубчатых стержней, применяемые в фермах. Узлы предназначены для легких ферм. В некоторых случаях допускаются небольшие эксцентриситеты. Для усиления узлов поставлены накладки, ребра жесткости. Оригинальна конструкция, где элементы прикрепляются к сфере, формирующей узел. Другая группа узлов показана на рис. 12.13. В местах соединений некоторые трубы раскосов сплющиваются — это упрощает сборочно-сварочные операции.

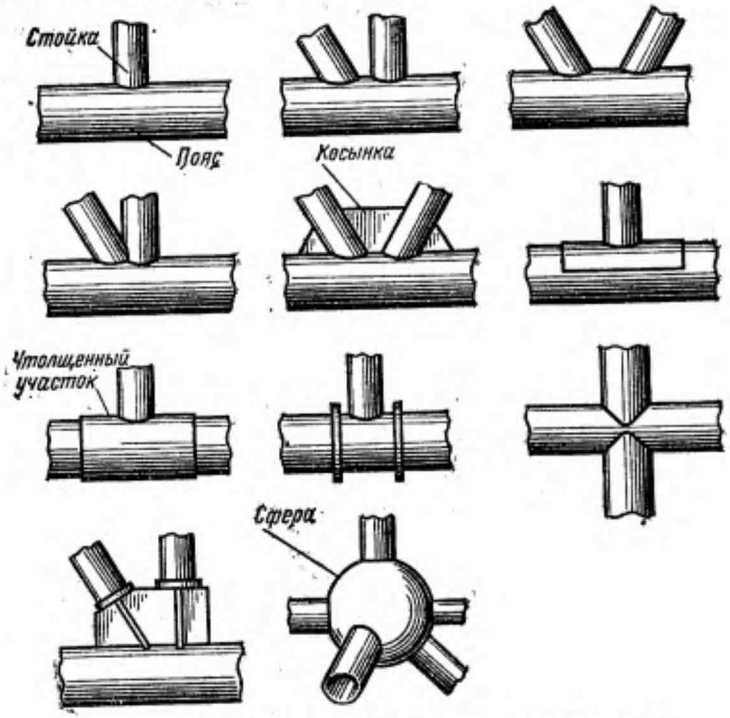


Рис. 12.12. Узлы трубчатых стержней разных типов

На рис. 12.14 показана ферма, имеющая тонкостенные трубчатые поперечные сечения элементов из гнутых профилей. Для увеличения их жесткости предусмотрены гофры. Каждый стержень составлен из двух гнутых половин, соединенных между собой двумя продольными связующими швами. По длине элементы сварены стыковыми соединениями, а узлы — тавровыми.

На рис. 12.15 приведен узел арматурной фермы из стержней периодического профиля. В узле соединения раскосов и стоек с поясом усилены косынкой.

В строительной промышленности при изготовлении прогонов междуэтажных перекрытий, кровель и т. п. применяют легкие фермы из круглой стали, называемые *прутковыми* (рис. 12.16). В ней верхние и нижние пояса сконструи-

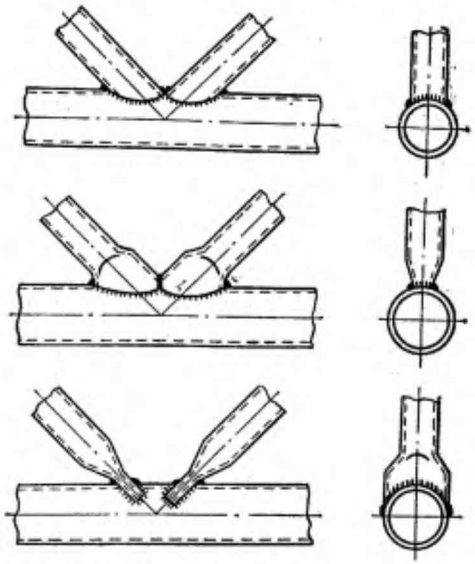


Рис. 12.13. Узлы трубчатых стержней со сплющиванием труб

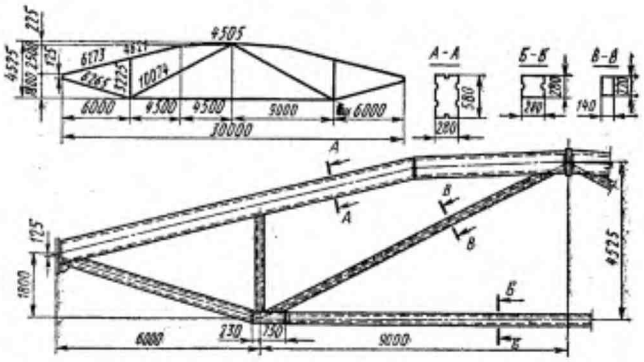


Рис. 12.14. Стропильная ферма из гнутых элементов

рованы из уголков легкого профиля, раскосы — из прутков. Узлы сварены вручную дуговой сваркой. Фермы указанного типа обладают малым весом, не требуют большого объема сварочных работ и экономичны, но могут быть рекомендованы лишь для работы под статическими нагрузками. В этих фермах целесообразно применение точечных соединений, которые обеспечивают хорошие свойства соединений круглого профиля с плоским.

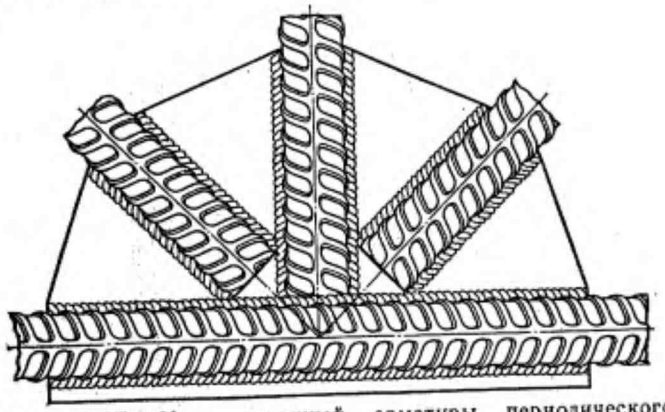


Рис. 12.15. Узел стержней арматуры периодического профиля

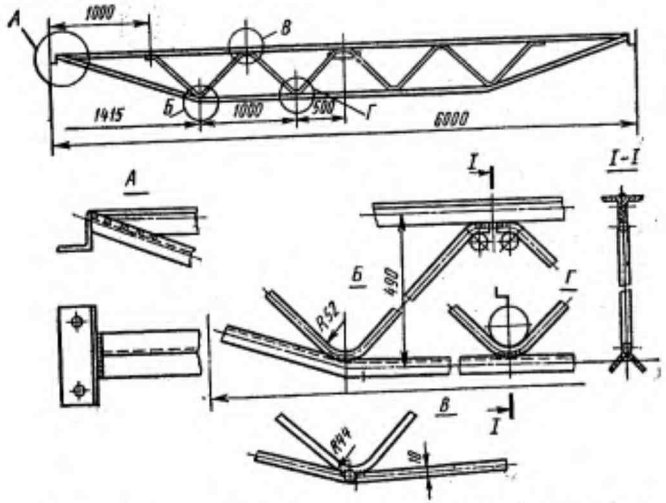


Рис. 12.16. Конструкция сварной легкой фермы с прутковыми раскосами

Выполнение сварочных работ в условиях монтажа, в особенности при низких температурах, можно заменить применением высокопрочных болтов (см. гл. 3).

Их постановка должна быть предусмотрена при проектировании, так как отверстия вызывают ослабление сечения прикрепляемых элементов косынок. Также предусматриваются накладки, компенсирующие ослабления.

§ 12.6. СТЫКОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ ПОЯСОВ

Стыковые соединения поясов ферм подразделяют на три вида.

1. Технологические — их применяют, если отсутствуют элементы требуемой длины; эти соединения следует конструировать равнопрочными с целым элементом, так как положение их не всегда возможно определить заранее.

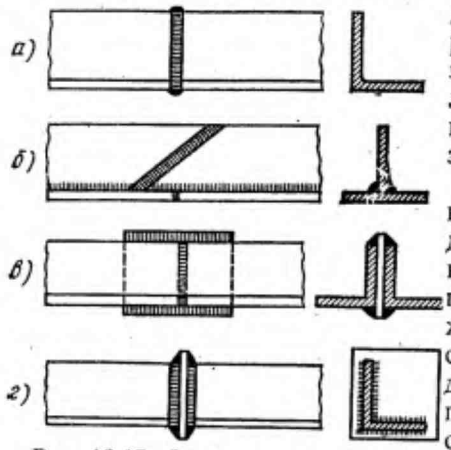


Рис. 12.17. Стыки поясов фермы

2. Конструктивные — их применяют для изменения поперечного сечения пояса от панели к панели; положение конструктивных стыковых соединений задано проектировщиком, поэтому расчет прочности можно производить по действующему расчетному усилию; их располагают в элементе на расстоянии, соответствующем 0,2. . .0,5 от длины панели от узла.

3. Монтажные — их назначают в зависимости от условий транспорта и наличия подъемно-транспортных средств на строительстве. При монтаже элементы предварительно собирают на болтах или струбцинах; после этого производят сварку соединений. Положение монтажных стыковых соединений всегда назначает проектировщик.

Наиболее целесообразны стыковые соединения с прямыми и иногда косыми швами (рис. 12.17, *а*, *б*). Эти типы соединений могут быть рекомендованы не только для уголковых и тавровых профилей, но и для Н-образных, П-образных и других разновидностей поперечных сечений. Указанные типы стыковых соединений применяют при работе элементов на растяжение и сжатие, в особенности при переменных нагрузках.

Для соединений поясов легких ферм в растянутых элементах можно допустить конструкции соединения, приведенные на рис. 12.17, *в*, а в сжатых — конструкции, приведенные на рис. 12.17, *г*.

Расчет прочности стыков производится согласно общим правилам расчета сварных соединений (см. гл. 3).

Стыковые соединения, выполняемые в монтажных условиях, могут быть спроектированы с применением высокопрочных болтов.

§ 12.7. РАЗНОВИДНОСТИ ПОКРЫТИЙ

Для покрытий применяют структурные конструкции, изготовляемые из секториальных узлов, соединяемых в центре сваркой (нередко ванным методом) (рис. 12.18). Структурные конструкции выполняются также складчатыми. В пространственной статически определимой системе изымают стержень, после чего она обращается в механизм,

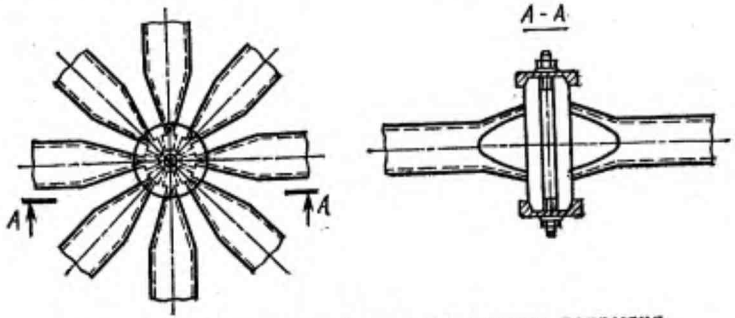


Рис. 12.18. Центральный узел купольного покрытия

может складываться, транспортироваться в таком состоянии на место установки, где вставляется недостающая связь и система снова обращается в ферму.

Большое внимание уделяется строительству легких ферм из гнутых тонкостенных элементов, структурным куполам, перекрывающим служебные и производственные помещения. Тонкостенные элементы в легких конструкциях часто свариваются точечной сваркой, а элементы из профилей, имеющих периодический характер,— дуговой или термитной.

Сложной является сварка сетчатых конструкций (рис. 12.19, *а*. . .*и*), изготовляемых из тонкостенных труб и других профилей. Соединения свариваются дуговой, контактной сваркой, а также паяются.

Сетчатые конструкции применяются: в висячих одностойных системах (*а*); в висячих системах с жестким поясом (*е*); в сплошных оболочковых системах (*к*. . .*м*) и др.

В указанных конструкциях применяют иногда композитные материалы, состоящие из алюминиевой матрицы и усилителей из стальной проволоки, соединяемые пайкой.

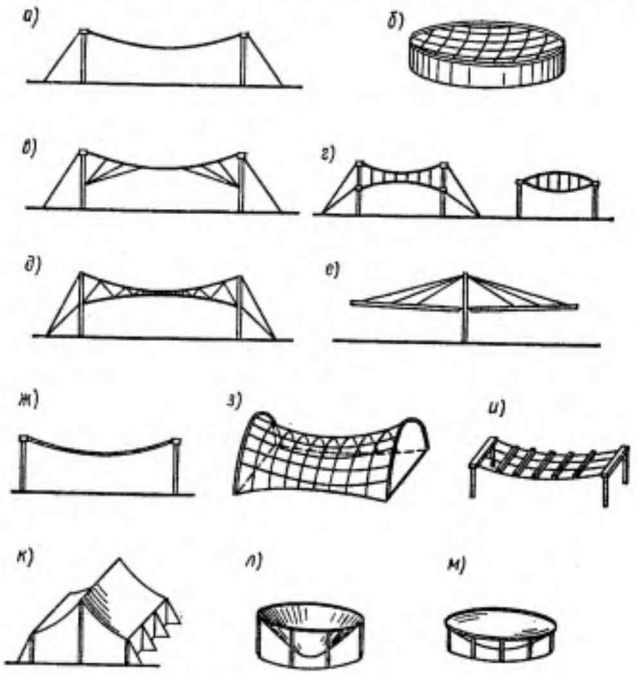


Рис. 12.19. Системы висячих покрытий

В тяжелых фермах иногда применяют композитные элементы, состоящие из стальных труб, заполненных бетоном. Подобные элементы наиболее целесообразны в арочных объектах. Они обладают хорошими показателями устойчивости.

§ 12.8. ПРИМЕНЕНИЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ФЕРМ

Алюминиевые сплавы могут быть рекомендованы для ферм, к которым предъявляются требования предельного сокращения веса, например для стрел подъемных кранов, сборно-разборных мостов, гидротехнических затворов, а также для объектов, работающих в условиях агрессивных сред. Наибольшее применение для несущей конструкции имеют сплавы АВТ, В92Т, АД33Т1, АМг6, АМг61. Важным преимуществом сварных алюминиевых ферм является их хорошая сопротивляемость ударным нагрузкам при низких температурах. Недостатком алюминиевых ферм по сравнению со стальными являются повышенные значения прогибов и малое значение коэффициентов φ, чувствительность к концентраторам напряжений, затруднения при сварке некоторых сплавов, в частности высокопрочных. При изготовлении ферм из алюминиевых сплавов применяют гнутые элементы, полученные прокаткой, прессованием, выдавливанием и другими способами. Как правило, конструкции ферм сваривают аргонодуговой сваркой, реже — контактной. Для обеспечения плотности соединений и улучшения антикоррозионных свойств иногда применяют склейку. Применение алюминия в конструкциях сборно-разборного типа позволяет уменьшить их массу по сравнению со стальными в 2,5 раза. Собственная масса перегружателя грузоподъемностью 30 т с пролетами (27+76+27) м вместе с механизмом составляет 435 т при применении алюминия и 786 т при применении стали.

Применение алюминиевых сплавов в строительных конструкциях достаточно широко: кровельные панели, потолки, подземные трубопроводы, радиобашни, силосные башни, декоративные объекты. Удельный вес алюминиевых материалов составляет 2,6. . .2,85 г/см^3; модуль упругости E=26 000 МПа.

Таблица 12.2

Механические свойства алюминиевых сплавов, применяемых в строительных конструкциях

Сплав	$\sigma_р$, МПа	$\sigma_т$, МПа	δ_5, %
АМг6М	320	160	15
АМг61М	360	210	11
Д16Т	420	300	10
В92Т (профильный)	430	300	10
В92Ти	500	420	8

Примечание. М—означает мягкое, отожженное состояние; Т—закаленное и естественно состаренное; Ти—закаленные и искусственно состаренные.

Допускаемые напряжения варьируют в зависимости от марки алюминиевого сплава и его обработки. Пределы прочности, текучести и относительное удлинение алюминиевых сплавов приведены в табл. 12.2.

Пределы текучести принимаются равными напряжению, вызывающему относительные остаточные удлинения 0,2%.

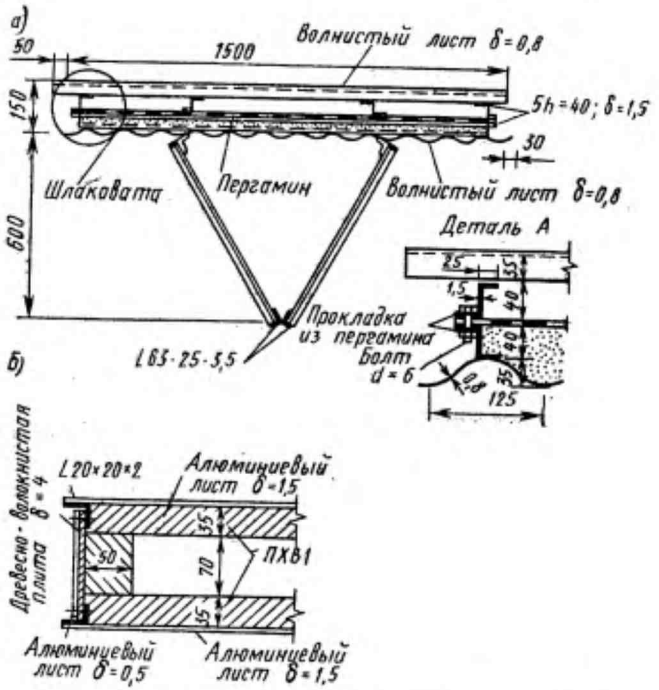


Рис. 12.20. Поперечный разрез кровельной панели размерами 12×1,5 м (*а*) и трехслойная кровельная панель (*б*)

В исходном состоянии алюминиевые сплавы пластичны. Они упрочняются нагартовкой или термообработкой. Исключительно разнообразен сортамент прессованных алюминиевых профилей: тонкостенные широкополых двутавров и тавров, уголковых, трубчатых, П-образных.

При соприкосновении алюминия с воздухом на его поверхности моментально образуется пленка из Al_2O_3, предохраняющая от последующей коррозии. Тем не менее некоторые алюминиевые прочные сплавы, например В95Т, обладают невысоким сопротивлением коррозии и плакируются

при обкладке листами чистого алюминия последующей прокаткой. Многие сплавы свариваются хорошо.

Закаленные алюминиевые сплавы соединяются удовлетворительно точечной контактной сваркой. При сварке дугой надлежит всемерно снижать термическое влияние швов на основной металл, по возможности уменьшать количество наплавленного металла.

Ввиду того что основные соединения из алюминиевых сплавов обладают высокой чувствительностью к концентраторам напряжений, следует по возможности придавать им повышенную податливость. Из-за невысокого модуля упругости снижается жесткость алюминиевой конструкции. Поэтому для большепролетных объектов рекомендуются арочные перекрытия, в особенности с бесшарнирными опорами.

Рентабельно применение трехслойных кровельных панелей, при этом используют пенопласт между соединяемыми листами, применяют клеесварные конструкции (рис. 12.20, *а*, *б*).

Эффективны алюминиевые переплеты из прессованных профилей, к которым стекла крепятся пружинами.

Конструкции из алюминиевых сплавов дешевле стальных лишь для некоторых типов объектов, например купольных, бесшарнирных большепролетных, арочных и др.

Пайка строительных конструкций применяется редко, например, для оцинкованных конструкций, в которых сварка ограничивается санитарными требованиями. В этих случаях пайка успешно заменяет сварку.

§ 12.9. ПРИМЕНЕНИЕ ПАЙКИ

До последнего времени соединения применялись главным образом в приборостроении и машиностроении. Однако пайка — это перспективный процесс и при изготовлении строительных конструкций, в частности мачтовых ферм для линии электропередач. При пайке используют соединения внахлестку. На рис. 12.21, *а*, *б* изображены паяные узлы одной из мачтовых ферм. Сами швы показаны заштрихованными. Размеры площади спая легко изменить в зависимости от расчетных усилий соединений.

Расчет прочности паяных швов в соединениях производят по формуле

$$\tau = \frac{P}{A} \leqslant [\tau'], \qquad (12.9)$$

где A — площадь паяного шва; $[\tau']$ — допускаемое напряжение паяного шва, зависящее от припоя и технологического процесса.

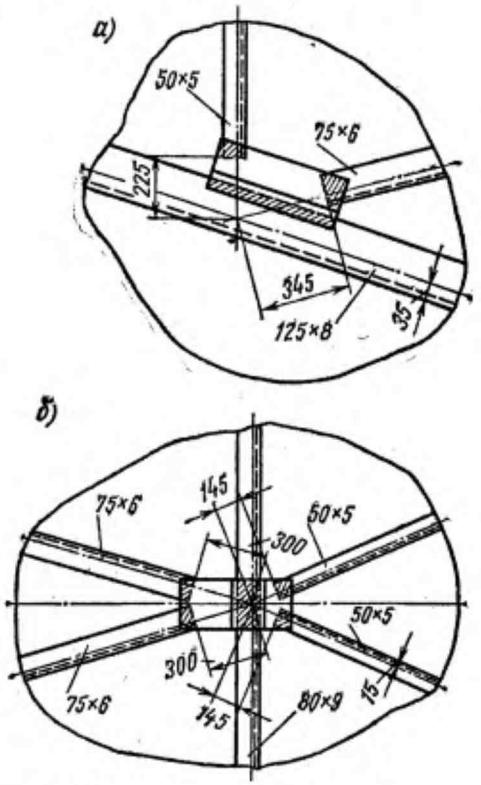


Рис. 12.21. Примеры паяных узлов мачтовой фермы

Проведенные исследования подтвердили достаточно удовлетворительную работу паяных соединений при статических и усталостных нагрузках.

§ 12.10. ПРИМЕР РАСЧЕТА ФЕРМЫ

Разработать конструкцию фермы из стали С 46/33 пролетом $l=12$ м по схеме, изображенной на рис. 12.22, *а*. Высота фермы $h=1$ м, длина панели $d=1$ м, $P=8$ кН, $\alpha=45°$.

Согласно нормам строительного проектирования для этой стали, расчетное сопротивление $R=270$ МПа. Чтобы перейти к опускаемым напряжениям, следует R умножить на коэффициент условия работы $m=0{,}8$. Таким образом, $[\sigma]_p=210$ МПа. Коэффициент надежности принимаем равным единице.

Определим расчетные усилия, пользуясь методом разрезания фермы и отсечения отдельных узлов. Затем выбираем геометрические характеристики сечений гнутых профилей и подсчитываем напряжения в стержнях. Все эти данные приведены в табл. 12.3 (значения коэффициентов φ взяты из табл. 11.1).

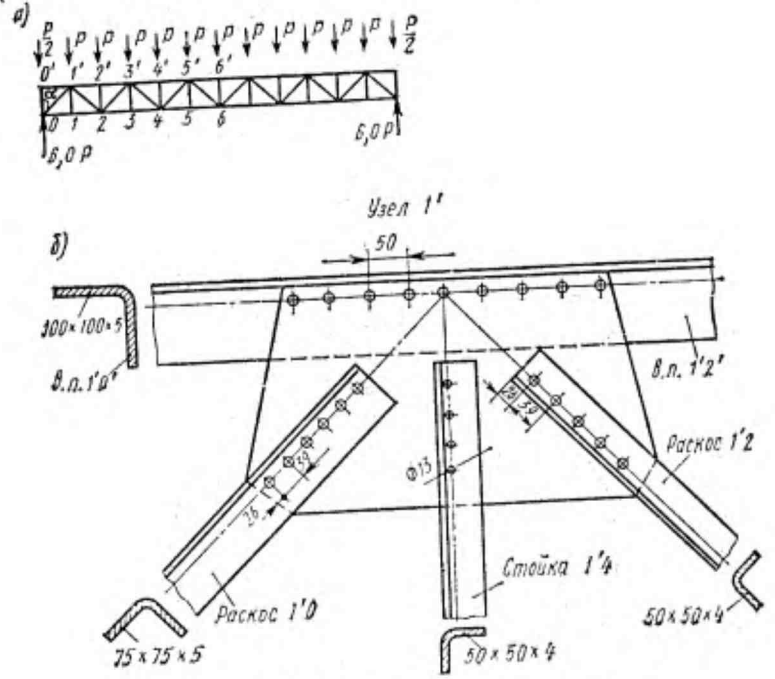


Рис. 12.22. К примеру расчета фермы:
а — схема фермы; *б* — узел верхнего пояса

Все соединения в узлах выполняются точечной контактной сваркой. Диаметр точки

$$d=1{,}5s+5=13 \text{ мм}.$$

Допускаемые напряжения при срезе из стали С 46/33

$$[\tau]=0{,}4\,[\sigma]_p=0{,}4\cdot 210=84 \text{ МПа}.$$

Допускаемое усилие на одну точку на основе опытных данных принимаем 12 кН.

Производим расчет соединений в узле $1'$ (рис. 12.21, *б*). Раскос $1'0$ прикреплен к косынке точками с допускаемым усилием на каждую точку 12,0 кН. Усилие в раскосе $1'0$ составляет 62,8 кН. Определяем требуемое число точек для прикрепления

$$i=\frac{62{,}8}{12{,}0}=5{,}3.$$

Принимаем 6 точек.

Таблица 12.3

Определение усилий в элементах фермы

Элемент	N, кН	Состав сечения	A, см²	r_{min}, см	l, см	λ	φ	σ, МПа
5'6'	−144,0	100×100×5	9,75	2,0	100	50	0,82	−180
56	+140,0	75×75×5	7,25	1,49	100	67	—	+193
6'6	−8,0	50×50×4	3,84	0,99	100	101	0,48	−46,2
01'	−62,8	75×75×5	7,25	1,49	141	95	0,52	−173,5
1'2	+51,4	50×50×4	3,84	0,99	141	143	—	+134
23'	−40,0	75×75×5	7,25	1,49	141	95	0,52	−112
3'4	+29,6	50×50×4	3,84	0,99	141	143	—	+77,0
45'	−17,1	50×50×4	3,84	0,99	141	143	0,24	−18,5
5'6'	+5,7	50×50×4	3,84	0,99	141	143	—	+14,9

Расстояние между точками $t=3d=3{,}9$ см.
Расстояние от точки до края листа $2d=2{,}6$ см.
Раскос *1'2* растянут силой 51,4 кН.
Требуемое число точек для его прикрепления

$$i=\frac{51{,}4}{12{,}0}=4{,}3.$$

Принимаем 5 точек.
Стойка *6'6* сжата силой 8 кН.
Требуемое число точек

$$i=\frac{8}{12{,}0}=0{,}7.$$

Принимаем 4 точки из соображения рационального конструирования.

Усилие, сдвигающее косынку (накладку) относительно пояса, по формуле (12.7)

$$T=(62{,}8+51{,}4)\sin 45^\circ=80{,}73\text{ кН}.$$

Число точек, прикрепляющих косынку к поясу,

$$i=\frac{80{,}73}{12{,}0}=6{,}7.$$

Принимаем 9 точек из соображений рационального конструирования.

§ 12.11. ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Предварительно напряженные элементы, работающие на продольные силы, могут применяться в поясах, раскосах, тяжелых фермах.

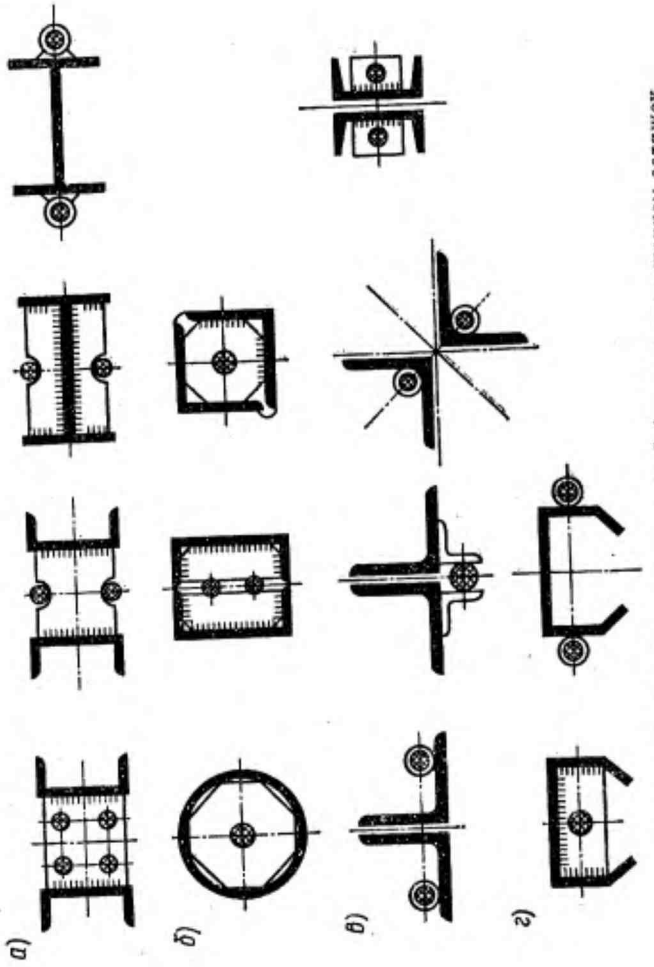


Рис. 12.23. Типы сечения стержней фермы с размещением затяжек

Сечение затяжек этих элементов проектируется симметричным относительно осей x и y в форме двух швеллеров, трубы и т. д. (рис. 12.23, *а*. . .*г*).

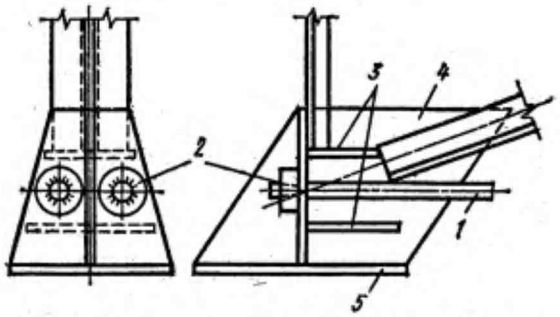
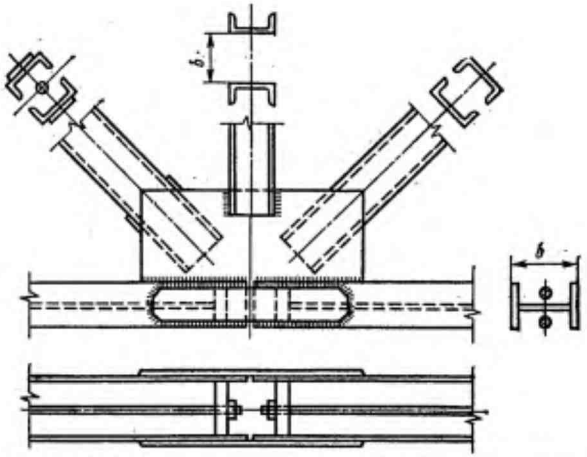


Рис. 12.24. Опорный узел фермы с анкерной затяжкой:

1 — затяжка; *2* — анкерная колодка; *3* — ребра жесткости; *4* — фасонка; *5* — опорная плита



Рис, 12.25. Узел фермы с предварительно напряженными стержнями

Иногда затяжки выполняются из стальных канатов, пучков и прядей высокопрочной проволоки. На рис. 12.24 изображено крепление затяжки крупного поперечного сечения к конструкции.

Напряжение стержня диаметром d создает обжатие конструкции.

Затяжки выполняются из стальных канатов, концы которых заводятся в стаканы, расплетаются, заливаются баббитом, бетоном с добавлением стружки. Натягивание осуществляется домкратами.

Предварительное натяжение уменьшает металлоемкость основной конструкции. Ее эффективность растет с повышением напряжения в затяжке, которую следует выполнять из высокопрочного металла.

Пример узла с напряженными стержнями изображен на рис. 12.25.

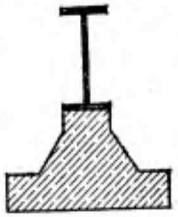


Рис. 12.26. Пример сталежелезобетонной конструкции



Рис. 12.27. Ортотропная плита

В железнодорожных мостах применяют сталежелезобетонные конструкции. На рис. 12.26 показан пример такой конструкции. Она представляет собой железобетонную плиту, соединенную с металлической балкой. Цель создания подобного объекта — повысить несущую способность конструкции и иметь железобетонную прокладку, понижающую ударное воздействие.

На рис. 12.27 показана ортотропная плита, устанавливаемая в качестве проезжей части на главной ферме моста. Плита состоит из ребер в форме полос, иногда с применением других профилей — швеллеров.

Контрольные вопросы к главе 12

1. Как определяют расчетные усилия в стержнях ферм?
2. Как определяют изгибающие моменты в поясах в случае загружения панели сосредоточенными силами?
3. Какие общие требования предъявляются к жесткости стержней ферм?
4. Какие типы сечений рекомендуются для сжатых и растянутых поясов?
5. Какие типы сечений рекомендуются для сжатых и растянутых раскосов?
6. В чем преимущество и недостатки трубчатых поперечных сечений?
7. Как подбирают сечения сжатых стержней?
8. Какая степень отклонения расчетных напряжений в стержнях ферм от допускаемых более желательна?
9. Целесообразно ли применение в верхнем поясе трубчатых элементов, а в нижнем — уголковых?

10. Если верхний пояс имеет тавровое поперечное сечение, то какие сечения следует рекомендовать для нижнего пояса, раскоса и стоек?

11. Если верхний пояс имеет Н-образное сечение, то какие типы сечений следует рекомендовать для нижнего пояса, раскосов, стоек?

12. Если верхний пояс имеет трубчатое поперечное сечение, то какой тип сечения следует рекомендовать для раскосов, стоек?

13. Все элементы поясов, раскосов, стоек имеют сечение в форме одного уголка. Дайте эскиз узла.

14. То же, для двух уголков. Дайте эскиз узла.

15. То же, для Н-образного сечения. Дайте эскиз узла.

16. То же, для трубчатых сечений. Дайте эскиз узла.

17. Как определяют расчетные напряжения в прикреплениях раскосов и стоек к поясам?

18. Как рассчитывают прочность швов, прикрепляющих прокладку к поясу?

19. То же, накладку к поясу.

20. В чем особенность конструирования ферм из алюминиевых сплавов по сравнению со стальными в отношении устойчивости сжатых элементов?

21. Какие фермы должны иметь большую высоту при заданном пролете, нагрузках и норме жесткости (отношение величины прогиба к пролету) из малоуглеродистой или низколегированной стали и почему?

22. Какое назначение имеют стыки поясов ферм?

23. Какие конструкции стыков могут быть рекомендованы для элементов уголкового, Н-образного и трубчатого профилей при растяжении и сжатии?

24. Целесообразно ли часто менять поперечное сечение поясов? Является ли это экономически выгодным?

25. Почему в стыках поясов следует стремиться сохранять неизменным положение центра тяжести элемента?

26. Как рассчитывают на прочность продольные швы стержней фермы таврового профиля при работе на растяжение? Являются ли эти швы рабочими или связующими?

27. То же, при работе на сжатие.

28. Как рассчитывают швы верхнего пояса таврового профиля, сваренного из двух листов при работе последнего на поперечный изгиб?

29. Рассмотрите образование связующих и рабочих напряжений в конструкции, указанной в предыдущем примере.

30. С какой целью в сжатых элементах, состоящих из двух уголков или швеллеров, предусматривается постановка прокладок? Можно ли отказаться от них и как при этом изменится проверка элементов на устойчивость?

31. Какие существуют пути для уменьшения веса ферм в отношении рационального выбора металла?

32. Что такое предварительно напряженные конструкции? Приведите примеры.

33. С какой целью применяют в фермах гнутые элементы?

34. Какие цели преследует типизация ферм?

35. Как устанавливается допускаемое напряжение в стержнях ферм, работающих при переменных нагрузках?

36. Какие типы соединений рекомендуются в фермах, работающих под переменными нагрузками?

37. Какие существуют типы облегченных ферм?

38. Целесообразно ли применение контактной сварки в фермах легкого типа?

39. Какие требования предъявляют к опорным узлам ферм?

40. Какие типы опорных частей для ферм могут быть рекомендованы?

41. Определите прогиб для среднего узла фермы, указанной на рис. 12.22.

42. Какова цель применения сетчатых конструкций?

43. Назовите виды коррозии ферм и пути борьбы с ней.

ГЛАВА 13

ОБОЛОЧКОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Оболочковые конструкции разделяют на две основные группы. К первой группе относят резервуары и другие изделия, предназначенные для хранения невзрывоопасных и неядовитых жидкостей и газов при давлении $p \leqslant 0{,}05$ МПа и температуре $T \leqslant 100$ °С. Эти конструкции изготовляют согласно общим правилам проектирования и требованиям эксплуатации промышленных сооружений. Ко второй группе относят котлы и сосуды, работающие под высоким давлением. Эксплуатация их находится под особым наблюдением инспекции котлонадзора. Эти конструкции проектируют и изготовляют согласно специальным техническим условиям.

§ 13.1. ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ РЕЗЕРВУАРЫ С ПЛОСКИМИ ДНИЩАМИ. РАСЧЕТ ОБОЛОЧЕК ПО МЕТОДУ ЛАПЛАСА

Основными элементами резервуара являются боковая стенка, покрытие и днище (рис. 13.1, *а*. . .*г*). Днище этих конструкций в большинстве случаев плоское, корпус цилиндрический. Такая форма рациональная с точки зрения прочности и возможности изготовления ее с наименьшим расходом металла. Изготовляют резервуары главным образом из сталей марок Ст2 и Ст3, а также из низколегированных сталей.

Оптимальное с позиции расхода металла соотношение между высотой h резервуара и его диаметром D определяется условием, что масса металла в днище и покрытии равна массе металла в цилиндрической части. При этом для объектов объемом 100. . .600 м³ $h/D = 1{,}25. . .0{,}85$; для объектов объемом до 10 000 м³ $h/D = 0{,}7. . .0{,}35$. Однако с учетом

требований технологии типовые проекты резервуаров вместимостью 100. . .2000 м³ предусматривают изменение высоты стенки от 5920 до 11 845 мм, тогда как в более крупных резервуарах (50 000 м³ и выше) высота остается практически постоянной и, как правило, не превышает 18 м.

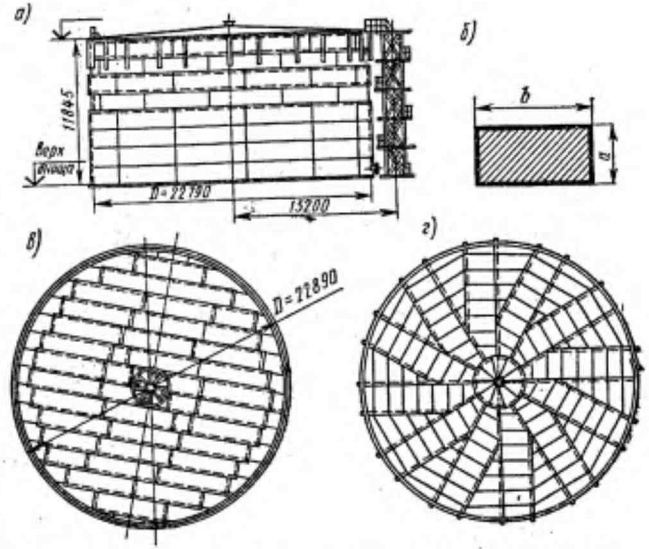


Рис. 13.1. Общий вид резервуара объемом 5000 м³:
а — фасад; *б* — схема элемента кровли; *в* — план днища; *г* — план крыши

Схематическое расположение швов на цилиндрической части резервуара показано на рис. 13.2, *а*. Продольные стыковые швы в нижней части оболочки располагают в одну нитку или вразбежку (рис. 13.2, *б*, *в*). На рис. 13.2, *б* показан продольный разрез нижней части оболочки соединения листов толщиной до 7. . .8 мм; на рис. 13.2, *в* изображены нахлесточные соединения. Размер нахлестки $a \geqslant 4s$, где s — толщина листа обечайки. Внешние швы нахлесточного соединения накладываются непрерывными, внутренние — прерывистыми. Последнее делается для улучшения условий контроля соединений на плотность. В местах пересечений горизонтальных и вертикальных швов производят подбивку листов, обеспечивающих плотность соединений. Продольные швы свариваются встык (рис. 13.2, *а*).

Толщину обечаек проектируют переменной и назначают согласно расчету на прочность. По безмоментной теории

оболочка рассматривается как гибкая, учитывающая лишь мембранные напряжения. Основными рабочими соединениями являются продольные швы обечаек. Их прочностью определяется толщина стенок резервуара.

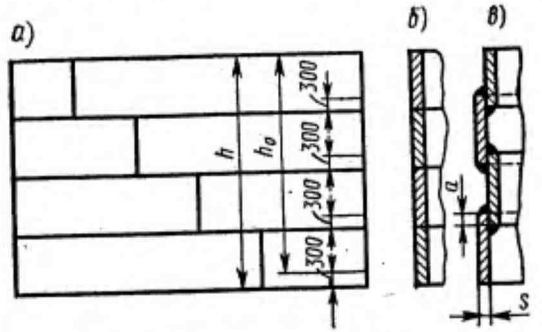


Рис. 13.2. Сварные соединения стенки резервуара:
а, б — расположение поясов при стыковых соединениях; *в* — ступенчатое расположение при нахлесточных соединениях поясов

Расчет оболочек производится как тонкостенных безмоментных систем по формулам Лапласа.

Игнорирование изгибающими моментами объясняется малой толщиной оболочек. При системах с толщиной в десятки миллиметров учитываются также изгибающие моменты и их влияние тем значительнее, чем меньше радиус обечайки.

Допустим, что давление в резервуаре на глубине y (рис. 13.3, *а*)

$$p = \gamma y, \tag{13.1}$$

где γ — удельный вес жидкости.

Определим напряжения в вырезанном из обечайки кольце шириной, равной единице. Рассечем кольцо плоскостью и приложим в месте разреза силы

$$N = \sigma \cdot s \cdot 1,$$

где σ — напряжение в кольце; s — толщина кольца.

Условие статического равновесия полукольца

$$-2N + 2\int_0^{\pi/2} pR\cos\alpha\, d\alpha = 0, \tag{13.2}$$

откуда

$$N = pR \int_0^{\pi/2} \cos\alpha \, d\alpha = pR. \qquad (13.3)$$

Напряжение в кольце

$$\sigma = \frac{pR}{s}. \qquad (13.4)$$

Напряжения σ действуют параллельно касательной к цилиндрической поверхности. Они возникают также и в

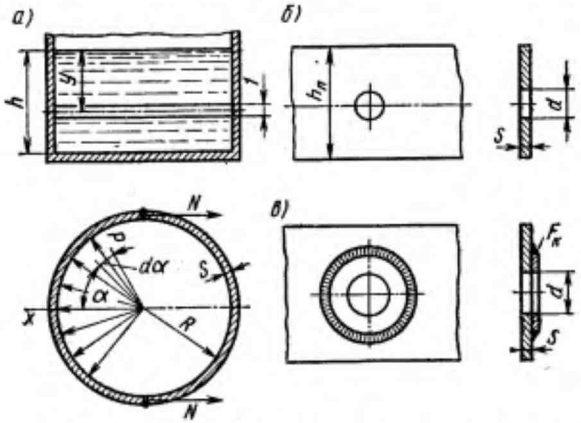


Рис. 13.3. К расчету цилиндрической части резервуара:

а — определение напряжений цилиндрической части; *б* — отверстие в цилиндрической части; *в* — цилиндрическая часть в месте отверстия усилена кольцом

продольном шве обечайки. Поэтому из условий прочности напряжение должно быть

$$\sigma \leqslant |\sigma'|_р.$$

Требуемую толщину $s_{тр}$ листа обечайки определяют по формуле

$$s_{тр} = \frac{pR}{|\sigma|_р}, \qquad (13.5)$$

где p — давление, определяемое по формуле (13.1); R — радиус резервуара в сечениях на расстоянии 300 мм от нижней кромки пояса рассчитываемой обечайки (см. рис. 13.2, *а*), т. е. $y = h_0$. Чем меньше давление p, тем соответственно тоньше листы обечайки. По соображениям рационального конструирования наименьшую толщину обечайки в резервуарах принимают равной 4 мм. Кольцевые швы в резервуарах напряжены значительно меньше.

При проектировании резервуаров в настоящее время применяют метод расчета прочности по предельному состоянию. При этом допускаемое напряжение определяется по формуле

$$[\sigma]_р = R_р m/n. \qquad (13.6)$$

В резервуарах из стали Ст3, сваренных электродами Э42, при использовании физических методов контроля швов расчетное сопротивление $R_р = 210$ МПа, а при визуальном методе контроля $R_р = 180$ МПа. Коэффициент условий работы $m = 0{,}8$; $n = 1{,}1$ — коэффициент надежности для гидравлического давления жидкости. Числовое значение $|\sigma|_р = 210 \cdot 0{,}8 \cdot 1{,}1 = 153$ МПа.

Результаты определения толщины поясов резервуара объемом $V = 5000$ м³ (см. рис. 13.3, *а*) приведены в табл. 13.1.

Таблица 13.1

Определение толщины s поясов резервуара

№ пояса	h, м	h_0, м	$s_{тр}$, мм	s, мм
VIII	1,48	1,18	0,88	4
VII	2,96	2,66	2,0	4
. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .
II	10,4	10,1	7,55	8
I	11,845	11,545	8,65	9

Примечание. $R = 11{,}44$ м — радиус цилиндрического резервуара.

В нахлесточных соединениях распределение напряжений неравномерно. В участках двойной толщины растягивающие напряжения, направленные по касательной к окружности, уменьшаются по сравнению с растягивающими напряжениями на участках вне нахлестки. Соответственно сокращаются значения кольцевых деформаций. Корпус в этих зонах имеет меньший диаметр, нежели между нахлесточными, поэтому элементы, направленные по образующей, испытывают изгиб.

Если в поясе предусмотрено отверстие для крепления труб (рис. 13.3, *б*), то обечайка в зоне отверстия ослабляется и в этом случае возможны два варианта расчета.

1. Допустим, что напряжение в сечении, ослабленном отверстием,

$$\sigma = \frac{pRh_{\text{п}}}{[(h_{\text{п}} - d)\,s]} \leqslant [\sigma]_{\text{р}}, \qquad (13.7)$$

где $h_{\text{п}}$ — высота пояса; d — диаметр отверстия. В этом случае отверстие не опасно, так как запас прочности в целом сечении настолько велик, что даже в месте выреза расчетное напряжение σ оказывается меньше допустимого.

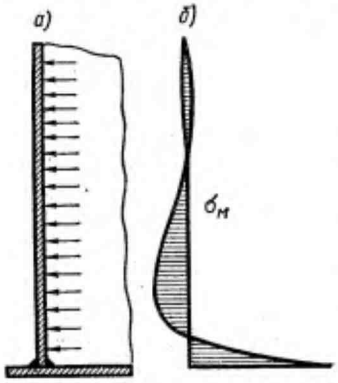


Рис. 13.4. Соединение цилиндра с днищем:
а — вид соединения; *б* — эпюра напряжения от изгиба

2. Предположим, что напряжение в сечении, ослабленном отверстием, больше допускаемого $|\sigma|_{\text{р}}$. В этом случае обечайку в зоне выреза обычно усиливают (рис. 13.3, *в*), например кольцом. Условно считают, что кольцо возмещает площадь металла, вырезанного из стенки.

Плоское днище резервуара (рис. 13.1, *в*), установленное на песчаное или бетонное основание, не несет рабочих усилий. Днище изготовляют из листов толщиной 4. . .8 мм в зависимости от диаметра резервуара. Нередко по периферии днища под вертикальными стенками укладывают более толстые листы. Например, если в средней части s=6 мм, то на периферии s=8 мм.

Соединение цилиндрической части с днищем является ответственным элементом конструкции (рис. 13.4, *а*). В месте соединения возникает изгибающий момент M, зависящий от толщины вертикальной стенки и днища, коэффициента жесткости основания и от длины участка листа днища (консоли), выступающего за стенку.

Приближенно момент, возникающий в месте соединения на единицу длины, определяется по формуле

$$M_1 = 0{,}1pRs. \qquad (13.8)$$

Напряжения в стенке резервуара

$$\sigma = \frac{M_1}{W} = \frac{0{,}1pRs}{1 \cdot \frac{s^2}{6}} = 0{,}6\,\frac{pR}{s}. \qquad (13.9)$$

Примем p=0,1 МПа для воды при h=10 м, R=10 м, s=1 см.

При этих условиях σ=60 МПа.

Напряжение направлено параллельно образующей. Эпюра распределения напряжений от момента по высоте стенки резервуара показана на рис. 13.4, *б*. Установлено, что соединение цилиндрической части с днищем двумя непрерывными швами обеспечивает прочность, поэтому обычно специального расчета на прочность для этого соединения не производят.

Крыши резервуаров (см. рис. 13.1, *б*) проектируют при условии выполнения основного объема заготовительных и сварочных работ на заводе. При наличии средней стойки покрытие расчленяют на отдельные щиты. Щит состоит из двух элементов, направленных радиально, нескольких поперечин и листов покрытия, привариваемых к ним. Радиальные и поперечные элементы, образующие каркас щита, изготовляют из профильных прокатных, гнутых или штампованных заготовок. Щит, с одной стороны, приваривают к оболочке, а с другой — опирают на центральную стойку.

Стальные листы кровли имеют толщину s=2. . .3 мм. Элементы каркаса воспринимают вертикальную нагрузку от собственного веса, веса снега, учитываемого в зависимости от района и угла наклона кровли, а также веса людей, которые могут находиться на кровле. Листовые покрытия рассматриваются при расчете прочности как пластины с опорой по контуру. Приближенно пластина при расчете может приниматься прямоугольной (см. рис. 13.1, *г*). Обозначим через a меньшую сторону прямоугольника, через b — бóльшую. Напряжения в пластине от нагрузок q, равномерно распределенных по ее плоскости,

$$\sigma = 6\alpha q a^2/s^2, \qquad (13.10)$$

где q — нагрузка от веса снега и собственного веса кровли; α=0,192 при a=b, α=407 при a=0,5b, s — толщина кровли.

Вес человека P может рассматриваться в качестве эквивалентной распределенной нагрузки

$$q_0 = 2P/ab. \qquad (13.11)$$

Каркас расчленяют на отдельные стержни, которые рассматривают при расчете на прочность как балки со свободной опорой, работающие на поперечный изгиб под действием вертикальных сил.

Если в конструкции резервуара предусмотрена средняя стойка, то она воспринимает около 33% всей вертикальной нагрузки на крышу. Она может быть нагружена как центрально (при условии симметричного загружения снегом всей крыши), так и эксцентрично. Стойку рассматривают как элемент, шарнирно закрепленный по концам, и проектируют согласно принципам расчета (см. гл. 9). Она может иметь решетчатую форму или форму трубы. Иногда ее используют в качестве барабана для навивки рулонированной поверхности днища.

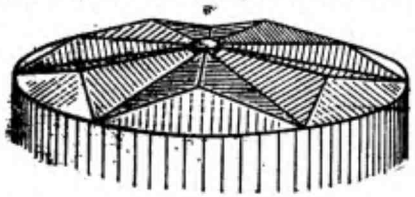


Рис. 13.5. Складчато-коническое покрытие резервуара

Шитовые покрытия резервуаров могут выполняться складчато-коническими (рис. 13.5), что обеспечивает значительную жесткость как местную (отдельных элементов), так и общую всего покрытия.

Непрерывно ведутся работы по увеличению объема цилиндрических резервуаров. В настоящее время изготовляют резервуары вместимостью 50 000 м³ и более. Проектируют резервуары еще больших размеров с двух- или трехслойными стенками цилиндрической части, составленными из рулонируемых полотнищ толщиной менее 16 мм.

§ 13.2. ЦИСТЕРНЫ

Так как давление p от веса жидкости, как правило, очень мало, то определение толщины стенок на основании формулы (13.5) приводит к очень малому значению s. Цистерны с такими стенками не обладают достаточной жесткостью, поэтому расчетные давления определяются согласно специальным техническим указаниям.

Конструктивные формы цистерн и типы сварных соединений выбирают в зависимости от условий работы. Так, для хранения нелетучих жидкостей (вода, масло, мазут) используют цистерны с неотбортованными днищами; их приваривают к обечайке угловыми швами. Сварные соединения листовых элементов обечайки нахлесточные. При этом днища делают коническими или даже плоскими. Плоские днища просты для изготовления, но при нагружениях возникают значительные напряжения от изгиба и возможно возникновение пластических деформаций. Для исключения пластических деформаций используют днища с отбортовкой, как это видно на рис. 13.6, где приведен пример горизонтальной стационарной цистерны из стали Ст3 объемом 75 м³. Цилиндрическая часть имеет продольные стыковые швы, расположенные вразбежку, и кольцевые нахлесточные соединения

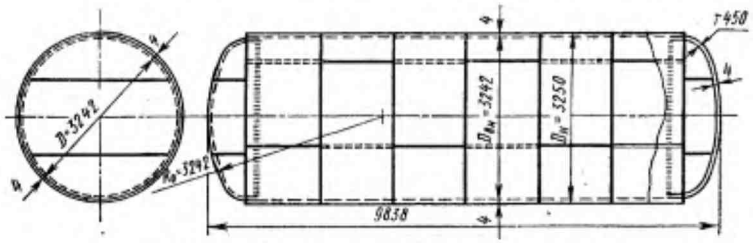


Рис. 13.6. Сварная горизонтальная цистерна

с угловыми швами. Толщина стенок цилиндрической части и днища $s=4$ мм. Днища сварены из нескольких листов стыковыми соединениями и имеют эллиптическую форму. Сопряжения цилиндра с днищем плавные.

В цистернах, предназначенных для транспортирования жидких продуктов, при движении возникают удары жидкости в днище, равносильные возникновению избыточного внутреннего давления. Поэтому все соединения транспортных цистерн выполняют стыковыми, как в сосудах, работающих под внутренним давлением, в том числе и соединение кромки отбортованного днища с цилиндрической обечайкой.

Типичны цистерны-вагоны для перевозки жидких продуктов. Ввиду их большого диаметра и большой жесткости они выполняют функцию несущей конструкции, поддерживаемой вагонными тележками.

В листовых конструкциях возле отверстий для приварки различного рода труб, патрубков, штуцеров образуются местные напряжения, создающие значительную концентрацию. Для ослабления эффекта выреза прибегают к местным усилениям стенки, например приваривают кольца, как это показано на рис. 13.7, *а*. Такое усиление применяют наиболее часто в резервуарах. Если диаметр патрубка невелик, применение усиливающего кольца становится необязательным (рис. 13.7, *б*). Для повышения плотности соединения

рационален глубокий провар шва (рис. 13.7, *в*) и применение деконцентраторов напряжений. Устранение концентрации напряжений достигается применением соединений, изображенных на рис. 13.7, *г*. Их применяют несмотря на то, что они наиболее трудны в технологическом отношении.

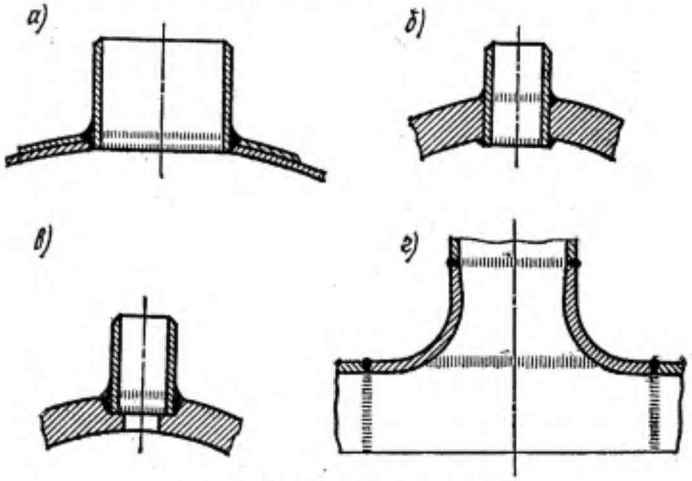


Рис. 13.7. Приварка патрубков:
а — усиливающим кольцом; *б* — при малом диаметре патрубка; *в* — при глубоком проваре; *г* — с устранением концентраций напряжений

Приварка патрубков к резервуарам оказывает значительное влияние на их прочность при работе под переменными нагрузками.

§ 13.3. ГАЗГОЛЬДЕРЫ И СФЕРИЧЕСКИЕ РЕЗЕРВУАРЫ

Газгольдеры конструируют в форме сосудов постоянного давления или постоянного объема. Последние более просты в изготовлении и позволяют хранить газ под высоким давлением. Газгольдеры переменного объема эксплуатируются при низком давлении. Чаще применяют мокрые газгольдеры, в нижней части которых помещается вода. Над водой находятся телескоп и колокол. Колокол под давлением газа может подниматься вверх вместе с телескопом. Колокол и телескоп зачерпывают воду своими карманами, которые служат затвором, не пропускающим газ наружу. Толщина стенок 4 мм, крыши колокола 2. . .3 мм. Газгольдеры постоянного объема (рис. 13.8) обычно имеют цилиндрическую форму диаметром несколько метров с выпуклыми, а нередко полусферическими днищами. Продольные и кольцевые швы — стыковые. Все швы (продольные и поперечные в цилиндрической части, а также в сферах) являются рабочими.

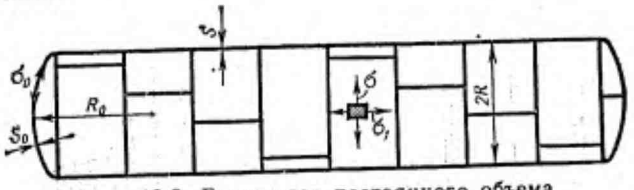


Рис. 13.8. Газгольдер постоянного объема

Напряжение в продольном шве цилиндрической части радиусом R с толщиной стенки s

$$\sigma = \frac{pR}{s}, \qquad (13.12)$$

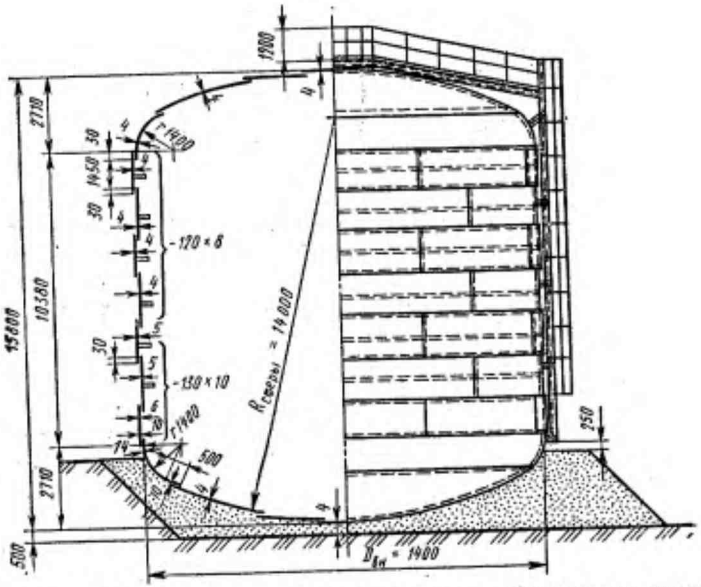


Рис. 13.9. Пример конструкции резервуара со сферическим днищем

а в поперечном шве

$$\sigma = \frac{pR}{2s}. \qquad (13.13)$$

Напряжения в сферической части радиуса R_0 с толщиной стенки s_0 составляют

$$\sigma = \frac{pR_0}{2s_0}. \qquad (13.14)$$

Подбор толщины стенок производят обычно по допускаемым напряжениям с учетом в первую очередь прочности продольного шва.

Газгольдеры постоянного объема могут быть со сферическим днищем (рис. 13.9), а также в форме сферы. При замене цилиндрических газгольдеров сферическими достигается экономия металла около 20%. В таких резервуарах соединения лепестков стыковые. Толщина лепестков обычно составляет 10. . .30 мм и, как правило, не превышает 40 мм. Это ограничение толщины диктуется отсутствием термообработки конструкции после сварки.

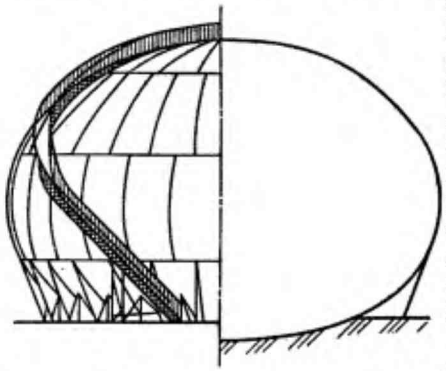


Рис. 13.10. Конструкция каплевидного резервуара

Напряжения в стенке сферического резервуара определяют по формуле (13.14). Они в два раз меньше, нежели в цилиндрическом, при одинаковых радиусах и толщинах стенок. Поэтому вес сферических резервуаров меньше, но конструкция сложнее.

На рис. 13.10 изображен пример каплевидного резервуара, близкого по форме к сферическому.

В то время как каплевидный резервуар опирается на мягкий грунт, сферический поддерживается жесткими металлическими опорами, вызывающими неравномерное распределение напряжений в зоне опор. Недостатком каплевидного резервуара по сравнению со сферическим является несколько усложненная технология изготовления. Каплевидные резервуары распространения не получили, а сферические, напротив, применяются широко.

§ 13.4. ПРИМЕНЕНИЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РЕЗЕРВУАРОВ И ЦИСТЕРН

Большое распространение получило строительство резервуаров и различного рода химической аппаратуры, работающих при низких температурах. Для таких конструкций очень важно выбрать материал, не подверженный хрупким разрушениям. Для изделий, работающих при температуре до —60 °С, применяют углеродистые стали с небольшим содержанием никеля (1. . .3,5%). Для конструкций, работающих при более низких температурах, применяют стали, содержащие 5% никеля; при этом необходима специальная термическая обработка. Сварку резервуаров из этих сталей можно успешно производить дуговыми автоматами, легированной проволокой. При этом допускаемые напряжения для сварных соединений составят около 200 МПа.

Резервуары, работающие при низких температурах, нередко устанавливают на судах. В результате вибраций от волн в этих судах в процессе эксплуатации в отдельных случаях возникали трещины усталости. Сталь с содержанием до 9% никеля хорошо работает в таких условиях при температуре конструкции до —160 °С. Предел прочности при этой температуре 650 МПа. Предел выносливости сварных соединений при пульсирующих нагрузках и обычном оформлении стыковых швов 100. . .110 МПа, а при последующей механической обработке 245 МПа.

Ударная вязкость в зоне, где температура при сварке достигает 900 °С, уменьшается в два раза, а в зоне, где $T=1275$ °С,— в 5. . .6 раз по сравнению с ударной вязкостью зон, не подвергавшихся нагреву.

Для хранения жидкого водорода изготовляют сварные сосуды из сплава, содержащего 60% железа и 40% никеля.

Успешно применяют для сварных сосудов, работающих при низких температурах, алюминиевые сплавы, которые свариваются дуговым и электрошлаковым способами. Нередко их изготовляют двухступенчатыми. Алюминиевые сплавы обладают повышенной стойкостью против коррозии, малой плотностью и сохраняют пластические и вязкие свойства при работе в условиях низких температур. Из листовых элементов изготовляют различные резервуары, стационарные и транспортные цистерны, вакуумные аппараты, теплообменники. На рис. 13.11 приведен пример резервуара из алюминиевого сплава, выполненного аргонодуговой сваркой. Все швы стыковые; толщина стенок цилиндрической части $s=6$. . .20 мм, сферического перекрытия $s=15$ мм, днища в сегментном кольце $s=15$ мм и в средней части $s=6$ мм.

В СССР значительное количество цистерн и резервуаров сварено автоматами под флюсом. Хорошо сваривают этим способом конструкции из сплава АМг6 и др. Соединения конструкций из алюминиевого сплава иногда обладают недостаточной сопротивляемостью образованию кристаллизационных трещин при сварке. Поэтому при проектирова-

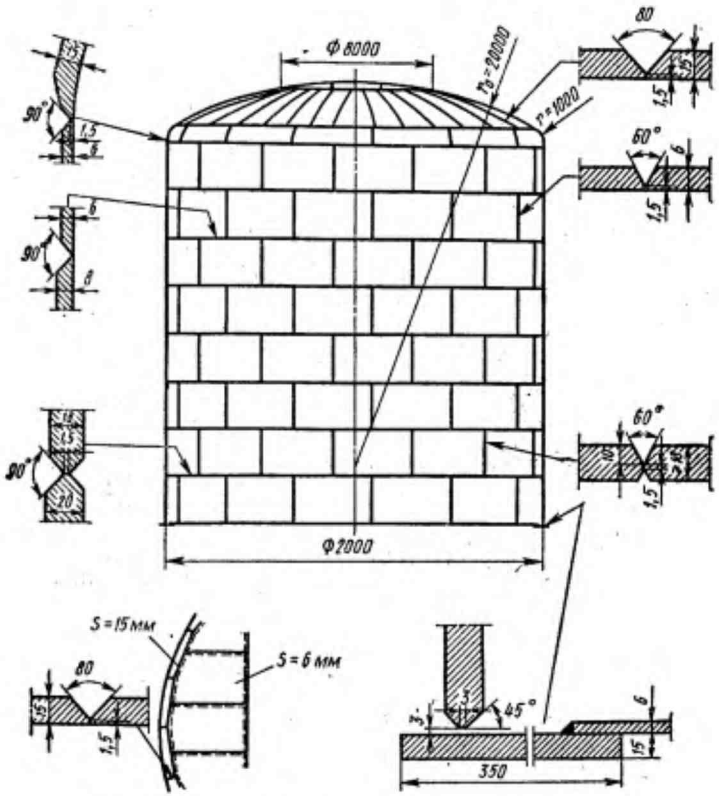


Рис. 13.11. Резервуар из алюминиевого сплава

нии следует учитывать это обстоятельство и избегать соединений очень высокой жесткости, при сварке которых возможно образование трещин.

§ 13.5. ТОНКОСТЕННЫЕ СОСУДЫ

По назначению, толщине листовых элементов, применяемым материалам и приемам сварки сосуды, работающие под давлением, весьма разнообразны. Общим для такого типа конструкций является требование обеспечить возможно более равномерное распределение напряжений. Этого достигают применением стыковых соединений, плавным сопряжением стыкуемых элементов и обеспечением надежного проплавления всей их толщины при условии всемерного исключения дефектов сварки.

Тонкостенные сосуды обычно являются конструктивными элементами различных транспортных установок, в том числе современных летательных аппаратов. Быстрый рост размеров ракет для космических полетов вызывает соответственное увеличение размеров емкостей. Это можно видеть на примере семейства ракет «Сатурн» с двигателями на жидком топливе (рис. 13.12). Так, цилиндрические баки со сферическими днищами, входящие в состав стартовой ступени S — $1C$ ракеты «Сатурн-5», имеют диаметр 10 м.

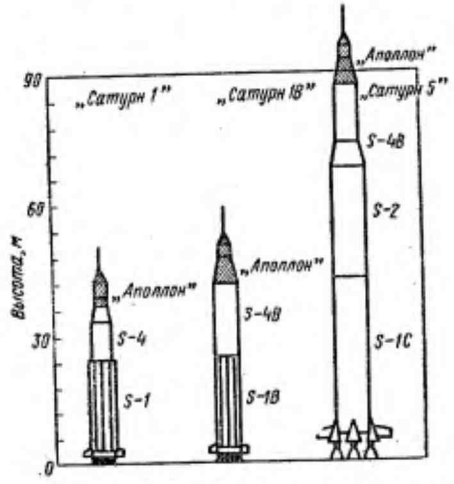


Рис. 13.12. Семейство ракет «Сатурн»

Один из них предназначен для жидкого кислорода, другой — для керосина. При работе двигателей эти емкости испытывают внутреннее давление, так как топливо и окислитель вытесняются принудительно подачей в кислородный бак газообразного кислорода, а в топливный бак — гелия. Кроме того, такие емкости нередко входят в состав несущей части конструкции и во время полета могут испытывать дополнительные сжимающие и изгибающие нагрузки. Для транспортных установок одним из основных показателей совершенства конструкции является ее минимальная масса. Поэтому при изготовлении тонкостенных сосудов широкое применение получили листовые материалы из алюминиевых, магниевых, титановых сплавов и высокопрочных сталей, обладающих высокой удельной прочностью. При изготовлении ракетных емкостей в зависимости от типа двигателей применяют либо алюминиевые сплавы (двигатели на жидком

топливе), либо высокопрочные стали или титановые сплавы (двигатели на твердом топливе).

Правильное представление о предельной несущей способности тонкостенного сосуда можно получить при рассмотрении его работы в пластической стадии. Особенностью является то, что при работе стенок за пределом упругой

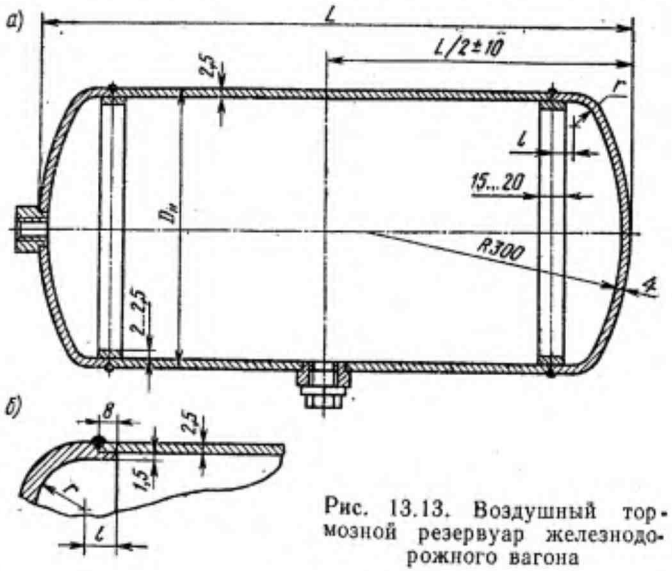


Рис. 13.13. Воздушный тормозной резервуар железнодорожного вагона

деформации и деформировании металла по всем направлениям максимальные кольцевые напряжения цилиндрических и сферических сосудов определяются в зависимости от диаграммы растяжения металла, которая приближенно выражается соотношением

$$\sigma = A\varepsilon^n, \qquad (13.15)$$

где σ и ε — истинные напряжения и деформации; A и n — коэффициенты, зависящие от механических свойств металла.

В цилиндрическом сосуде при монотонном нагружении максимальное давление достигается при кольцевой пластической деформации $\varepsilon_1 = n/2$. При этом максимальное условное растягивающее напряжение $\sigma_{1\,max}$ может не соответствовать пределу прочности $\sigma_в$ при $n \leqslant 0{,}26$ (диаграмма имеет пологий характер); $\sigma_{1\,max} < \sigma_в$ при $n > 0{,}26$ (диаграмма имеет крутой характер).

Действительная конструкционная прочность сосудов в результате концентрации напряжений может оказаться

ниже предельной. Большое влияние оказывает отношение $\sigma_т/\sigma_в$. В случае, если $\sigma_т/\sigma_в = 0{,}6 \ldots 0{,}75$, конструктивная прочность сосуда приближается к предельной. Если $\sigma_т/\sigma_в = 0{,}9$, то конструкционная прочность может оказаться значительно меньше предельной.

Если в тонкостенном сосуде создается вакуум, то оболочки надо проверить на устойчивость. Цилиндрические оболочки при длине $l \leqslant 10r$ (r — радиус цилиндра) проверяются по формуле

$$\sigma_{кр} = 0{,}55Er\left(\frac{s}{r}\right)^{3/2}/l, \qquad (13.16)$$

где $\sigma_{кр}$ — критическое напряжение; s — толщина оболочки; E — модуль упругости.

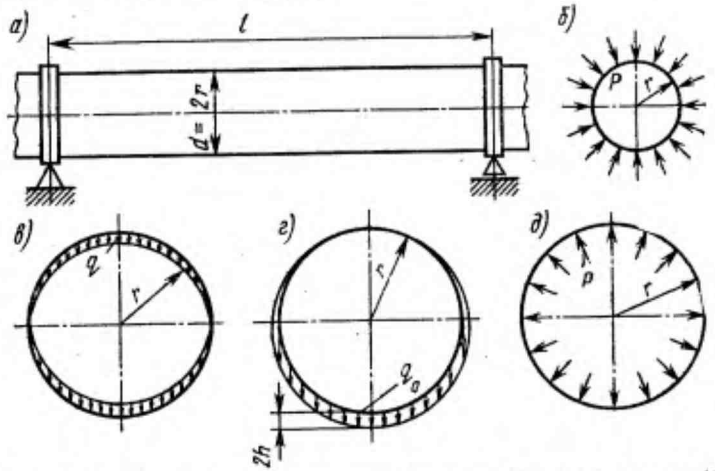


Рис. 13.14. Схема загружения трубопровода (*а*) от вакуума (*б*), от собственного веса (*в*), от обледенения (*г*), от внутреннего давления (*д*)

Устойчивость сферической оболочки определяется формулой

$$\sigma_{кр} = 0{,}1Es/r. \qquad (13.17)$$

Допускаемое напряжение $[\sigma]_р \leqslant (0{,}5 \ldots 0{,}6)\,\sigma_{кр}m$, где $m = 0{,}8$ — коэффициент условий работы.

Тонкостенные сосуды в виде различных тормозных баллонов для наземного транспорта изготовляют крупными сериями, используя хорошо свариваемые материалы относительно невысокой прочности. Примером может служить воздушный тормозной резервуар железнодорожного вагона из углеродистой стали (рис. 13.13). Он имеет отбортованные

днища, приваренные к обечайке стыковым соединением. Его выполняют либо на остающемся подкладном кольце (рис. 13.14, *а*), либо с проточкой отбортованной части днища (рис. 13.14, *б*). Чем больше диаметр $D_н$, тем более нагруженными оказываются резервуары; при расчете на прочность учитывают возможность уменьшения толщины стенок в результате коррозии на 0,7. . .1 мм. Коэффициент запаса прочности $n=\sigma_в/[\sigma]_р \geqslant 3{,}5$.

При изготовлении ацетиленовых баллонов применяют сталь 15ХСНД, ее предел прочности $\sigma_в=520$ МПа, предел текучести $\sigma_т=350$ МПа.

Допускаемое напряжение $[\sigma]_р=[\sigma]_в/n_1$, где коэффициент запаса прочности $n_1=2{,}6$. Допускаемое напряжение может определяться также по формуле $[\sigma]_р=\sigma_т/n_2$, где $n_2=1{,}5$.

§ 13.6. ТРУБЫ И ТРУБОПРОВОДЫ

Сварные трубы большого диаметра широко используют при сооружении магистральных газонефтепроводов. Для изготовления таких труб применяют низколегированные стали 14ХГС, 17ГС, 17Г1С и др. Толщина стенок труб 8. . .20 мм, диаметр 529. . .1420 мм.

Из сварных труб сооружают также трубопроводы металлургических и других заводов, гидротехнических сооружений, а также трубопроводы атомных и тепловых электростанций. При этом трубы, работающие при температуре от —10 до +350 °С и давлении $p \leqslant 9$ МПа, изготовляются из стали Ст3сп и низколегированных сталей 10Г2СД, 14ХГС. Трубы, работающие при температуре от —50 до +350 °С и давлении $p \leqslant 70$ МПа,— из сталей 20 и 30ХМА. Трубы, работающие при высоких температурах (до 600 °С),— из молибденовых сталей, например 15ХМ и др. Для работы в агрессивных средах трубы изготовляют из аустенитных нержавеющих сталей, алюминиевых, титановых и других сплавов. Кроме того, сварные трубы широко применяют в санитарно-техническом строительстве и в ряде специальных областей техники.

Сварные трубы имеют продольные или спиральные швы, при монтаже трубопроводов отдельные трубы свариваются между собой поперечными кольцевыми швами. Прочность трубопроводов оценивают с учетом различного рода усилий, действующих в процессе эксплуатации. Расчет продольных стыков при внутреннем давлении p производят по формуле

$$\sigma = \frac{pR}{s}. \qquad (13.18)$$

В кольцевых стыках создается напряжение, определяемое по формуле

$$\sigma_1 = \frac{pR}{2s} \qquad (13.19)$$

где R и s — соответственно радиус и толщина стенки трубы.

При понижении внешней температуры в кольцевых стыках образуются напряжения

$$\sigma_2 = \alpha \Delta T E, \qquad (13.20)$$

где α — коэффициент температурного расширения металла; ΔT — изменение температуры; E — модуль упругости.

Если труба будет испытывать изгибающий момент M от собственного веса и веса жидкости, то при расчете следует учитывать образование в кольцевых швах напряжений

$$\sigma_3 = \frac{M}{W}, \qquad (13.21)$$

где W — момент сопротивления сечения трубы. Момент M определяется по специальным техническим условиям.

Суммарное напряжение в кольцевых швах определяется следующим образом:

$$\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \leqslant [\sigma']_р.$$

Допускаемое напряжение в трубопроводах зависит от расчетного сопротивления $R_р$ (обычно $R_р=0{,}9\sigma_т$), коэффициента условий работы m и коэффициента надежности n; $m=0{,}8. . .0{,}9$, а в местах перехода через препятствия $m=0{,}75$; $n=1{,}2$ для газопроводов и $n=1{,}15$ для нефтепроводов.

Трубопроводы иногда устанавливают на опорах: анкерных, устанавливаемых в конечных точках и в местах изменения направления оси; промежуточных, не препятствующих продольным перемещениям. Конструкции опор зависят от диаметров труб. При относительно малых диаметрах ($d \leqslant 0{,}6$ м) допускается применение опор простейшего типа — *скользящих*; при средних диаметрах ($d=0{,}6. . .1{,}5$ м) — *седловых*; при больших ($d>1{,}5$ м) — *катковых или качающихся*.

Если трубопровод большого диаметра ($d>1{,}5$ м) (рис. 13.14, *а*) выполняет функции газопровода низкого давления, он подвержен воздействию собственного веса (рис. 13.14, *в*), обледенения (рис. 13.14, *г*), внутреннего давления газа (рис. 13.14, *д*), возможного разряжения (рис. 13.14, *б*), а также ветра и изменения температуры.

Нагрузка q от собственного веса трубопровода равномерно распределена. Приближенно трубопровод можно принять за многоопорную неразрезанную балку. При этом изгибающий момент на опоре

$$M_q = \frac{ql^2}{8}. \qquad (13.22)$$

Напряжение от момента

$$\sigma_q = \frac{M_q}{W}, \qquad (13.23)$$

где $W=[\pi(r_1^4-r_2^4)]/(4r_1)$ — момент сопротивления кольца; r_1 — наружный радиус кольца; r_2 — внутренний радиус.

Аналогично определяются усилия и напряжения при обледенении. Если принять толщину слоя льда в нижней точке $2h$, а в верхней точке равной нулю, то отношение веса обледенения к длине, выраженное в кН/м, определяется по приближенной формуле

$$q_0 = 7rh\gamma, \qquad (13.24)$$

где γ — удельный вес льда.

Примем $h=0{,}1$ м. Тогда получим $q_0=0{,}7r\gamma$, момент от обледенения

$$M_{q_0} = q_0 \frac{l^2}{8}; \qquad (13.25)$$

напряжение от момента

$$\sigma_{q_0} = \frac{M_{q_0}}{W}. \qquad (13.26)$$

Если замыкание трубопровода производилось при температуре T_1, то при понижении температуры до значения T_2 в нем возникает продольное растягивающее усилие

$$N_т = 2\pi rs\,(T_1 - T_2)\,E\alpha, \qquad (13.27)$$

где α — коэффициент температурного расширения, для стали $\alpha=12\cdot10^{-6}$; s — толщина стенки трубы.

Наряду с продольной силой в стенке трубопровода при неравномерном охлаждении возникают напряжения изгиба

$$\sigma_т = \alpha E\,(T_н - T_в)/2, \qquad (13.28)$$

где $T_н$ — температура наружной поверхности трубы; $T_в$ — температура внутренней поверхности.

Усилие от внутреннего давления p в зоне изменения направления трубопровода вызывает в его поперечном сечении напряжение

$$\sigma_{поп} = \frac{pr}{2s}. \qquad (13.29)$$

Таким образом, полное напряжение в поперечном сечении, а также в кольцевом шве трубопровода

$$\sigma_{расч} = \sigma_q + \sigma_{q_0} + \alpha E\,(T_1 - T_2) + 0{,}5\,\alpha E\,(T_н - T_в) + \frac{pr}{2s} \leqslant [\sigma']_р. \qquad (13.30)$$

В продольном сечении трубопровода образуются напряжения, определяемые по формуле

$$\sigma_{прод} = \frac{pr}{s} \leqslant [\sigma']_р. \qquad (13.31)$$

В одних случаях бóльшим по значению оказывается напряжение $\sigma_{расч}$, в других — $\sigma_{прод}$.

Если возможно образование разряжения (рис. 13.14, *б*), внешнее давление воздуха вызывает в продольных сечениях оболочки трубопровода напряжения сжатия, которые могут достигать критического значения и вызывать потерю устойчивости. Если принять трубопровод за длинную цилиндрическую трубу без закреплений, то критическое давление определяется по формуле

$$p_{кр} = \frac{3EJ_1}{r^3}, \qquad (13.32)$$

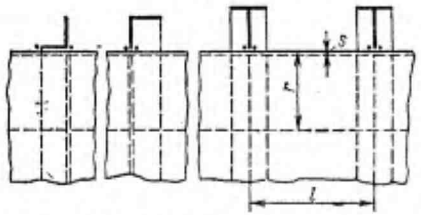


Рис. 13.15. Кольца жесткости уголкового и таврового профилей, приваренные к трубопроводу

где J_1 — момент инерции относительно собственной оси продольного сечения стенки трубопровода длиной 1 м; r — средний радиус оболочки.

Для повышения устойчивости оболочки иногда предусматривают постановку кольцевых ребер жесткости. Их типы уголкового и таврового профилей изображены на рис. 13.15. Критическое давление $p_{кр}$ в этом случае находят из соотношения

$$p_{кр} = \frac{3EJ}{lr^2}, \qquad (13.33)$$

где l — расстояние между смежными ребрами жесткости; J — момент инерции кольца и оболочки на длине

$$a = 1{,}6\sqrt{rs}. \qquad (13.34)$$

При вычислении $p_{кр}$ по формулам (13.32) и (13.33) должно выполняться неравенство

$$p_{кр} \geqslant m(q_{внеш} - p_{внутр}). \qquad (13.35)$$

В этом случае $m=1{,}7$.

Чтобы уменьшить продольные усилия, возникающие в трубопроводе вследствие изменения температуры, применяют различные способы. В некоторых случаях трубопроводы укладывают на катковые опоры, усиливая трубопровод в этом месте кольцом жесткости. Для повышения податливости в продольном направлении трубопроводы иногда опирают на качающиеся стойки, используют также компенсаторы.

Трубопроводы с высоким внутренним давлением (напорные), применяемые в гидротехнике, проектируются согласно изложенным принципам.

В трубопроводах, работающих при относительно невысоких внутренних давлениях, возможно применение плоскосворачиваемых труб. Эти трубы обладают малой массой и достаточно хорошими эксплуатационными свойствами.

Как правило, трубопроводы рассчитывают в основном на статическую нагрузку. В особых случаях учитывают пульсацию давления транспортируемой среды и импульсный характер ветровых нагрузок. В магистральных трубопроводах могут возникать протяженные разрушения, когда местный разрыв стенки трубы сопровождается быстрым продвижением трещины на десятки или же сотни метров. Такой тип разрушения имеет место только в газопроводах. Это происходит вследствие того, что скорость продвижения конца трещины оказывается весьма большой, и давление газа внутри трубы не успевает снизиться до того уровня, который требуется для остановки трещины. С увеличением давления газа, диаметра трубопровода и толщины его стенки опасность появления таких разрушений увеличивается, особенно при низких температурах. Для исключения опасности протяженных трещин можно либо использовать трубы из металла с высокой сопротивляемостью развитию разрушения, либо переходить к многослойным трубам из относительно тонких листов. Однако стали с высоким сопротивлением развитию разрушения требуют введения легирующих добавок, которые дороги. Огромное народнохозяйственное значение трубопроводного транспорта для передачи газа на большие расстояния заставляет вести исследования в разных направлениях.

§ 13.7. ДОСТИЖЕНИЯ СССР В СТРОИТЕЛЬСТВЕ ОБОЛОЧКОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В СССР имеется ряд достижений в строительстве оболочковых конструкций.

В ИЭС им. Е. О. Патона был разработан индустриальный метод изготовления различных видов листовых конструкций. Цилиндрическая часть крупнейших резервуаров первоначально сваривается в заводских условиях, далее рулонируется и в рулонируемом состоянии транспортируется на площадку, где устанавливается и производится сварка лишь замыкающих стыков. Замена сложной монтажной сварки, выполняемой ручным способом, автоматической сваркой в условиях цеха обеспечила значительное улучшение качества и повышение производительности (авторы данного метода отмечены Ленинской премией). Данный способ применяется в ряде стран.

Рулонируется не только цилиндрическая часть резервуаров, но и днища, а также сферические резервуары. Это подлинная техническая революция в строительстве оболочковых объектов.

За последние пятилетия в Советском Союзе осуществлено грандиозное строительство газо- и нефтепроводов с диаметром до 1420 мм при давлении до 80. . .90 атм. Из прочных сталей при протяжении в тысячи километров с переброской газа из северо-восточных районов страны в центр и на запад.

Трудной операцией является монтажная дуговая сварка кольцевых швов труб газопроводов, уложенных в траншеи в неповоротном состоянии.

Большой объем работ проводится по сварке кольцевых швов труб малых тонкостенных диаметров (15. . .150 мм). Разработаны различные автоматические установки для их соединений в среде защитных газов при обходе инструментом с плавящимся или неплавящимся электродом по всему периметру трубы. В настоящее время трубы небольших диаметров изготовляются также из полимеров. Сварка кольцевых соединений производится горячим лезвием и методом трения.

Выдающимся достижением советской техники является создание на основе разработок ИЭС им. Е. О. Патона высокоавтоматизированных установок «Север» для контактной сварки труб, уложенных в траншеи в неповоротном состоянии. Указанные установки сваривают стык за несколько десятков минут; время, затрачиваемое на сварку такого стыка сварщиком вручную, составляет около двух рабочих дней.

Большим бедствием являются разрывы трубопроводов. Образовавшиеся трещины распространяются по трубопроводу с огромной скоростью, в особенности в условиях низких температур. Подобные разрушения подчас сопровождаются и человеческими жертвами.

В СССР разработан ряд методов по локализации подобных разрушений. Выпускаются трубы с продольными спиральными швами, тормозящими трещины в случае их образования.

В МГТУ им. Баумана был впервые отработан способ радиочастотной сварки (см. гл. 2), который нашел широкое распространение в нашей стране и во многих других странах при изготовлении труб из тонкостенного материала (s=6. . .7 мм); обладает огромной производительностью и исключает применение ручного труда.

§ 13.8. БАРАБАНЫ КОТЛОВ

В котельные агрегаты, работающие под давлением, входят барабан, экономайзеры, пароперегреватели и камеры. Барабаны котлов высокой производительности имеют

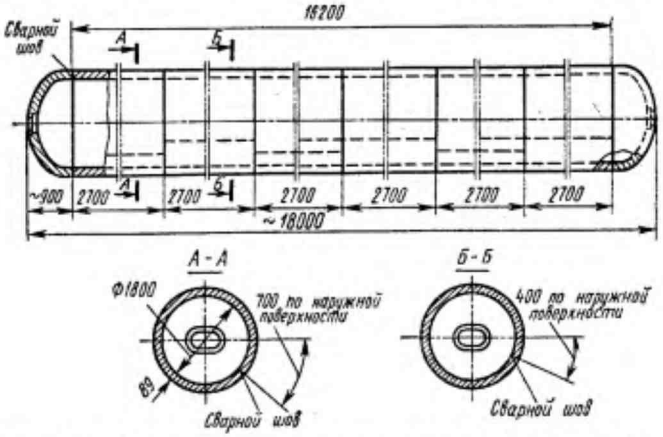


Рис. 13.16. Общий вид сварного барабана котла ТП-80

диаметры 1600. . .1800 мм, толщина их стенок достигает 100 мм, длина бывает различной. Барабан состоит из отдельных обечаек, днища барабанов, как правило, штампованные. Все соединения барабанов выполняются электрошлаковой сваркой.

На рис. 13.16 изображен барабан котла ТП-80. Его длина 16,2 м, толщина стенок 89 мм. Все соединения сварены встык, продольные швы — вразбежку. На рис. 13.17 изображены некоторые типичные узлы барабана котла ТП-42 с большим количеством штуцеров. Они изготовляются из отрезков труб и обвариваются по контурам.

При температуре котла меньше 450 °С применяют трубы из углеродистых сталей, при более высокой температуре применяют трубы из низколегированной стали.

При давлении в барабане меньше 6 МПа применяют стали марок 15К, 20К, а при давлении больше 6 МПа — сталь марки 22К.

Котлы, пароперегреватели, экономайзеры подлежат освидетельствованию и контролю качества сварных соединений физическими методами: рентгеновскими или γ-лучами, радиоактивных элементов. Просвечивание швов часто заменяется их прозвучиванием ультразвуковыми колебаниями.

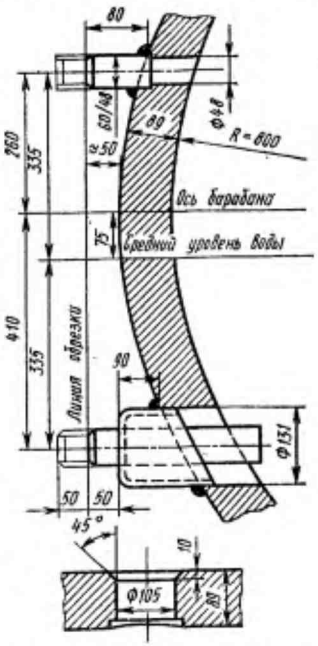


Рис. 13.17. Сварные узлы барабана котла ТП-42; приварка штуцеров

Сосуды, предназначенные для работы при очень высоком давлении, выполняют многослойными, так как при сплошной стенке напряжения на внутренней ее поверхности оказываются значительно большими, чем на внешней, и прочность материала стенок использовать полностью не удается. Формируя стенку из отдельных слоев, можно путем предварительного натяжения каждого слоя создать такое распределение напряжений, которое при рабочем нагружении сосуда внутренним давлением обеспечит относи-

тельно равномерную работу всех слоев. За рубежом многослойные сосуды изготовляют для работы под давлением до 200,0 МПа и выше.

Конструктивное оформление таких сосудов и способы создания начальных напряжений при изготовлении многослойных обечаек могут быть различными.

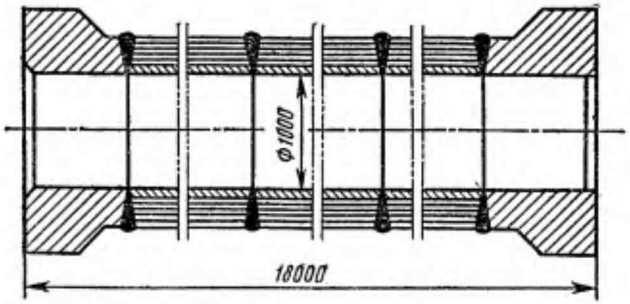


Рис. 13.18. Конструктивное оформление многослойного сосуда

Изготовленные одним из этих способов многослойные обечайки сваривают между собой встык кольцевыми швами, к обоим концам цилиндрической части сосуда приваривают днище или кованые фланцы для крепления крышек (рис. 13.18).

§ 13.9. КОРРОЗИЯ ОБОЛОЧКОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Бóльшая часть сварных конструкций, подверженных воздействию активных коррозионных сред, представляет собой конструкции оболочкового типа (реакторы, емкости, баллоны, трубопроводы). Коррозия определяется главным образом свойствами основного и присадочного металла, агрессивностью среды, условиями напряженного состояния и технологией сварки. Существенное влияние на коррозию оказывают также температура, кавитация и другие физические эффекты. Наиболее типичные формы коррозии — сплошная, или общая, и местная. Местная коррозия может быть межкристаллитной, если она происходит в зоне перехода от шва к основному металлу, ее называют ножевой.

Общая (сплошная) коррозия имеет место в низкоуглеродистых сталях и в сварных соединениях сталей, алюминиевых сплавов (АМг6, АД) в атмосферных условиях, в соленой воде и т. д. Общая коррозия оценивается уменьшением массы, глубиной коррозии, изменением механических свойств за данный отрезок времени.

Местная межкристаллитная коррозия развивается в аустенитных сталях и в их сварных соединениях, например в среде азотной кислоты при различных концентрациях; межкристаллитная коррозия наблюдается в сплавах и в соединениях титана ВТ1-1, ОТ4 в различных средах, а также в низкоуглеродистых сталях в щелочных растворах.

Неоднородность поля напряжений, как правило, оказывает незначительное влияние на общую коррозию, но заметно интенсифицирует местные виды коррозии, наиболее опасным из которых является растрескивание. Переменные напряжения способствуют ускорению процесса растрескивания, при этом для коррозионно-усталостного разрушения характерно образование многих усталостных трещин на поверхности оболочки, а не только в местах концентрации напряжений, как это обычно наблюдается при нагружениях в нейтральной среде.

Для конкретной среды и материала скорость роста трещины зависит от коэффициента интенсивности напряжений K_1 и его размаха ΔK_1 в пределах цикла нагружения, т. е. она возрастает по мере их увеличения. Увеличение трещины сопровождается повышением скорости ее роста, причем процесс коррозионного разрушения особенно ускоряется при приближении коэффициента K к критическому значению.

В сварных соединениях коррозионное разрушение происходит, как правило, быстрее, чем в основном металле. Это объясняется тем, что сварные соединения неоднородны. Они могут иметь:

структурно-химическую неоднородность: макронеоднородность, определяемую наличием в соединении различных структурных зон, и микронеоднородность вследствие наличия зерен включений;

неоднородность напряженного состояния и пластического деформирования;

геометрическую неоднородность вследствие наличия дефектов формы и внутреннего строения (непровары, трещины), вызывающих концентрацию напряжений. Устранение перечисленных видов неоднородности способствует повышению стойкости сварных соединений против коррозионного растрескивания. С этой целью используют различные мероприятия. Так, при сварке аустенитных сталей в зоне высоких температур возникает структурно-химическая не-

однородность вследствие выпадания из раствора хрома, переходящего в карбид хрома. Обеднение стали хромом понижает ее коррозионную стойкость. Для устранения этого явления в сталь вводят легирующие элементы (титан, ниобий), связывающие углерод в карбиды.

Неоднородность поля напряжений и пластических деформаций связана главным образом с наличием остаточных напряжений. Проведение отпуска значительно снижает сумму напряжений ($\sigma_{нагр}+\sigma_{свар}$) в конструкции и улучшает сопротивление коррозионному растрескиванию. Коррозионная прочность существенно улучшается при снижении сварочных напряжений до уровня, соответствующего $0{,}25\sigma_т$. Поэтому сварные сосуды и оболочки, работающие в коррозионной среде, рекомендуется подвергать общему отпуску при температуре 500. . .600 °С для снижения остаточных сварочных напряжений и восстановления пластических свойств. При изготовлении негабаритных оболочковых конструкций целесообразно подвергать местному отпуску замыкающие кольцевые швы, выполняемые на монтаже.

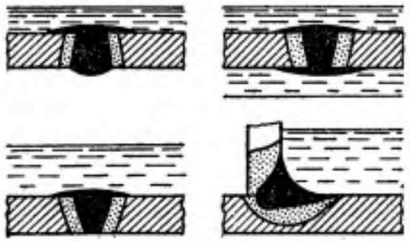


Рис. 13.19. Виды Т-образного шва

Устранение вредного влияния геометрической неоднородности обеспечивается рациональным проектированием. Следует избегать образования концентраторов напряжений. В частности, опасным дефектом являются щели, где легко развиваются щелевая коррозия. В этом отношении стыковые соединения лучше нахлесточных и тавровых. Целесообразно применять различные методы обработки поверхности ультразвуком, прокаткой, обработкой для образования сжимающих напряжений на поверхности, способствующих повышению стойкости против коррозии. Полезно использование технологических приемов. Например, когда коррозионные трещины возникают в зоне сплавления, имеет смысл выполнять швы стыковых соединений Т-образной формы, как показано на рис. 13.19. При таком оформлении шва линия сплавления располагается почти параллельно растягивающему компоненту напряжения. Поэтому даже в случае возникновения коррозионной трещины в зоне сплавления она будет распространяться перпендикулярно растягивающему компоненту напряжения, т. е. по основному металлу, имеющему более высокое сопротивление росту трещины.

Повышение коррозионной стойкости может быть получено применением защитных покрытий металлов: плакированием, металлизацией, нанесением гальванических покрытий, окраской. Нанесенные покрытия способствуют торможению разрывов пленок, что является часто очагом пониженных потенциалов и началом коррозионных разрушений.

Расчет несущей способности сварных конструкций оболочкового типа с учетом эффекта коррозии производится согласно ГОСТ 14249—80.

Контрольные вопросы к главе 13

1. Какие виды конструкций относятся к оболочковым?
2. В чем состоит расчет оболочек по методу Лапласа? В чем особенности расчета тонкостенных оболочек?
3. Какие виды напряжений возникают в цилиндрической части резервуара хранилища?
4. Какие виды напряжений возникают в плоских днищах резервуаров хранилищ и в зонах их соединений в цилиндрической части?
5. В чем состоит метод расчета резервуаров по предельному состоянию?
6. Как определяются напряжения в кольцевых швах, в частности постоянного объема?
7. Почему не целесообразны плоские днища в газгольдерах постоянного объема?
8. Укажите пути уменьшения концентраций напряжений в зонах сосуда, ослабленных отверстиями.
9. Как определяется напряжение в плоских днищах сосудов, не имеющих сплошного основания?
10. В чем преимущества и недостатки шаровых сосудов по сравнению с цилиндрическими?
11. В чем состоит особенность определения расчетных нагрузок в железнодорожных цистернах?
12. Как изготовляются газгольдеры постоянного давления?
13. В чем состоит индивидуальный метод изготовления резервуаров?
14. Какие требования предъявляются к оболочковым конструкциям, работающим в условиях низких температур?
15. Какие особенности имеют конструкции семейства ракет «Сатурн»?
16. В чем особенность предельной несущей способности сосудов, работающих в упругопластической стадии?
17. В чем состоит проверка тонкостенных конструкций на устойчивость?
18. Какие марки сталей применяются в трубопроводах?
19. Перечислите разновидности напряжений, возникающих в газопроводах. Какие из них наиболее опасны для прочности?
20. Какие внешние нагрузки действуют на трубопровод помимо внутреннего давления?

21. Какие мероприятия предусматривают против потери устойчивости трубопроводов?
22. Перечислите основные достижения СССР в строительстве газопроводов. Какое значение для строительства имеет аппарат «Север»?
23. Опишите типичные формы конструкций котлов.
24. От чего зависит скорость роста трещины, образованной в трубопроводе?
25. Какие виды коррозии имеют место в оболочковых объектах при действии агрессивных сред?
26. Какие существуют меры против коррозионного растрескивания трубопроводов?
27. Нанесение каких покрытий повышает коррозионную стойкость трубопроводов?
28. Какие методы обработки повышают коррозионную стойкость?
29. С какой целью резервуарам придают каплевидную форму?
30. Какие преимущества и недостатки алюминиевых емкостей по сравнению со стальными?
31. Возможно ли производить расчет толстостенных оболочковых конструкций по формулам Лапласа?
32. Можно ли изготовлять толстостенные объекты многослойными?

ГЛАВА 14

СВАРНЫЕ ДЕТАЛИ МАШИН

§ 14.1. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВАРКИ В ДЕТАЛЯХ МАШИН

Изделия тяжелого машиностроения — станины, прессы, валы, различные тепловые установки большой мощности — выпускаются индивидуально или мелкими сериями. Сварные рамы, барабаны имеют толщину стенок до 100 мм и более. При этом часто свариваются электрошлаковым способом. В исключительных случаях в деталях машин толщина достигает более 2 м.

В процессе изготовления нередко осуществляют промежуточные термические обработки для снятия остаточных напряжений.

Сварные элементы столь больших толщин заменяют крупногабаритные отливки, поковки. Из проката, отливок, поковок меньших габаритов сваривают крупногабаритные объекты, создание которых единым металлургическим процессом оказалось бы трудноосуществимым или даже невозможным. Возможность расчленения проектируемого объекта на составляющие с последующим воссоединением частей в единое целое является одним из ярких достижений сварочной технологии. Примерами таких сверхмощных установок являются прессы с усилием 60. . .70 тыс. т, изготовленные на заводах в СССР.

Крупногабаритные толстостенные конструкции производятся в судостроении, атомном машиностроении и других видах химического машиностроения. Конструкции изготовляются из прочных сплавов, нередко хорошо сопротивляющихся агрессии, воздействию высоких и низких температур. Допускаемые напряжения в таких объектах, как суда, устанавливаются в них с учетом низкочастотных нагружений.

Параллельно с применением сварных конструкций тяжелого машиностроения, изготовляемых в индивидуальном производстве, сварные конструкции часто изготовляются однотипными крупными сериями. Например, рычаги, кронштейны, рамы, редукторы, зубчатые колеса, шкивы, барабаны, маховики и т. д., представляющие собой элементы целых машин.

Указанные объекты, выпускаемые, как правило, сериями, свариваются дуговой, контактной стыковой и точечной сваркой. Валы свариваются также электрошлаковым способом, трением, в более редких случаях при применении высококачественных материалов в камерах электронным лучом.

Сварка находит широкое распространение в приборах механических, оптических, радиотехнических, электронных.

В этих областях сварочной техники также нужна главным образом точность изготовления и отсутствие изменения размеров с течением времени.

Сварка применяется микроплазменная, контактная, точечная, роликовая, лазерная — преимущественно твердотельная, а также пайка.

В машино- и приборостроении непрерывно используются новые материалы, соединение разнородных металлов с неметаллами, например металлов с силицидами, карбидами, со стеклом, графитом и т. д.

Соединения из полимеров образуются, как правило, при помощи ультразвука, тонкие металлы — горячим лезвием, высокопластичные — холодным способом. Трудносвариваемые металлы соединяются также диффузией, пайкой, например керамические изделия и др. На очереди стоит задача соединения сетчатых и дисперсных композитных материалов.

§ 14.2. ОБЩИЕ СООБРАЖЕНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Детали машин сваривают из заготовок, получаемых самыми различными способами.

Многие конструкции сваривают из прокатного материала. К ним относятся рамы, станины, барабаны, корпуса

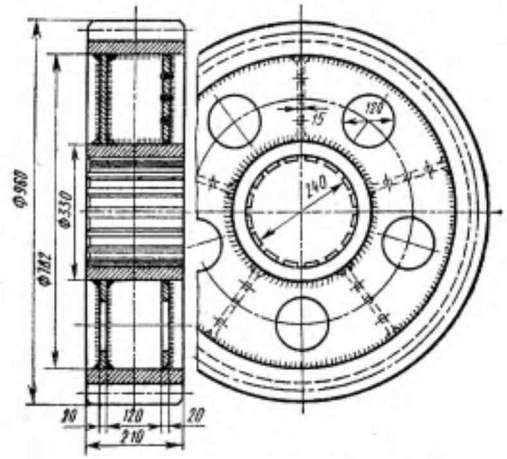


Рис. 14.1. Двустенчатое сварное зубчатое колесо

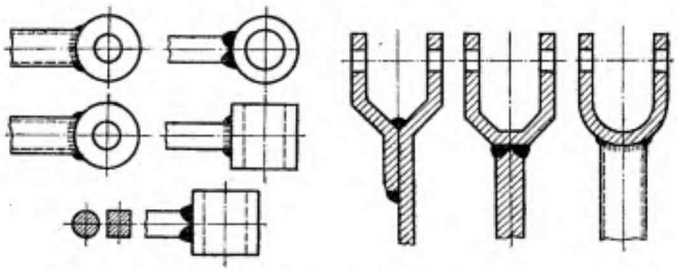


Рис. 14.2. Штанги с проушинами

редукторов, зубчатые колеса (рис. 14.1), штанги с проушинами (рис. 14.2), сварные тяги (рис. 14.3). На рис. 14.4, *а*. . . . . *в* приведены сварные конструкции подшипниковых опор разных систем. Все они выполнены из листового проката с усилением корпусов приваркой ребер жесткости. Замена литых деталей машин сварными позволила получить экономию до 50% массы металла.

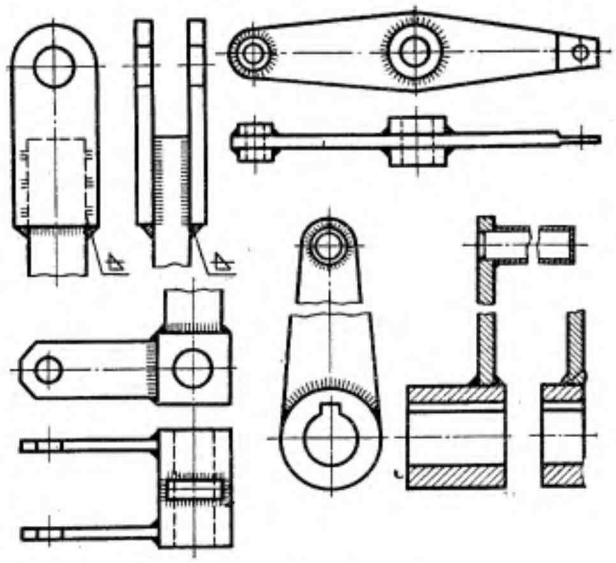


Рис. 14.3. Сварные тяги

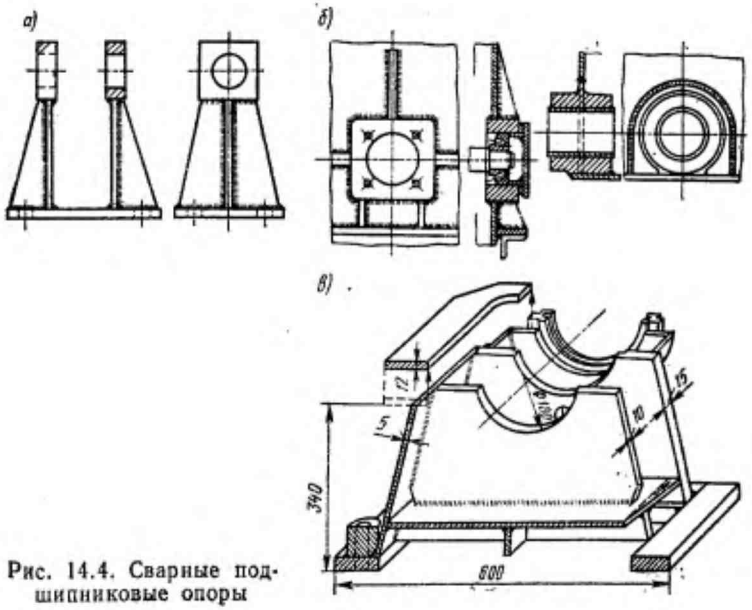


Рис. 14.4. Сварные подшипниковые опоры

Примерами конструкций, изготовленных из поковок, служат различные сварные валы (рис. 14.5, *а*, *б*). Применение составных поковок упрощает изготовление, требует меньшего объема механической обработки и способствует удешевлению производства.

При производстве сварных деталей машин рекомендуется применять листовой прокат, фасонные профили, предпочтительно тонкостенные, гнутые, прессованные, штампованные заготовки, обеспечивающие возможность изготовления

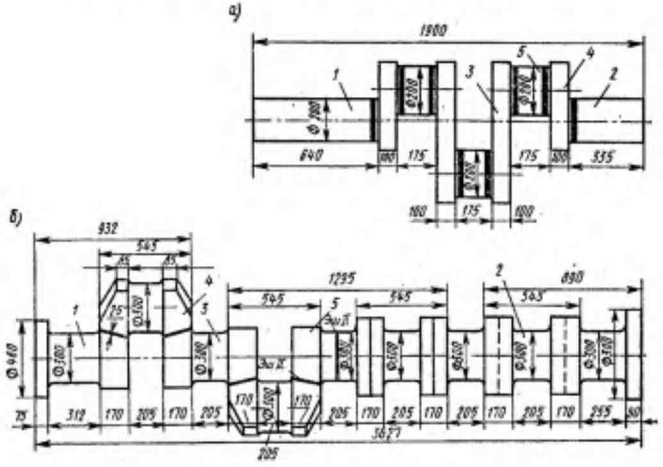


Рис. 14.5. Сварно-прокатный коленчатый вал гидронасосной установки (*а*), сварно-кованая носовая часть коленчатого вала (*б*)

легких сварных изделий повышенной жесткости и устойчивости. Штампосварные изделия можно встретить в авиационных конструкциях, тракторах и автомобилях, строительных конструкциях. Область применения штампосварных конструкций непрерывно расширяется. Сварку литых деталей применяют для упрощения технологического процесса литья.

Масса скрытых стальных деталей часто бывает в два раза меньше, чем литых чугунных, при одинаковых прочности и жесткости.

При создании новых, все более модных конструкций тяжелого машиностроения (турбин, котлов, металлургического и станочного оборудования) изготовление их деталей и узлов литьем, ковкой и штамповкой представляет большие, иногда непреодолимые трудности. Применение электрошлаковой сварки открыло путь к созданию комбинированных сварных изделий больших размеров из отливок, поковок и проката, экономичных по массе, с минимальными припусками на механическую обработку.

Для производства деталей машин средних размеров с общей площадью сечений до 50 000 мм² перспективно использовать стыковую контактную сварку. Таким способом изготовляют, например, картеры тепловозных дизелей, собираемые и свариваемые из унифицированных отливок методом последовательного наращивания. При серийном выпуске деталей небольших размеров используют контактную сварку, сварку трением, сварку под флюсом, в среде CO_2 и т. п.

В деталях машин, например в телескопических соединениях трубчатых элементов разных диаметров, в элементах, соединяемых внахлестку и втавр, в изделиях сложной геометрической формы, при которых наложение сварных швов оказалось бы затруднительным, целесообразно применять пайку.

Помимо процессов сварки и пайки в деталях машин большое значение имеют процессы наплавки. Наплавка применяется не только для восстановления изношенных поверхностей при их ремонте, но и при изготовлении новых деталей с целью придания им желаемых заданных свойств. Так, быстрорежущую сталь наплавляют на поделочную с целью получения недорогих износостойких инструментов, а твердые сплавы на трущиеся поверхности машин и механизмов — для повышения их износостойкости. При проектировании деталей с наплавкой следует учитывать возможность применения новых способов сварки, например взрывом. Применяют также поверхностную закалку кислородно-ацетиленовым пламенем и ТВЧ. Этот процесс требует тщательной технологической отработки. Тем не менее закалка находит разностороннее применение на машиностроительных заводах при обработке цистерн, бандажей, крановых бегунов и т. п.

При проектировании деталей машин следует учитывать факторы.

1. Диапазон применяемых марок сталей широк: наряду с низкоуглеродистыми и низколегированными сталями применяют высоколегированные. Иногда заготовки подвергают термической обработке до сварки. В качестве конструкций предъявляются высокие требования.

2. В деталях машин размеры элементов нередко определяются условиями не прочности, а жесткости. В этом

случае рабочие напряжения принимаются значительно ниже допускаемых.

3. В деталях машин большое значение имеет точность изготовления. Остаточные напряжения в сварных конструкциях, находящихся в эксплуатации, с течением времени меняют свое значение. Вследствие этого в конструкции появляются деформации. Поэтому сварные изделия, изготовляемые и обрабатываемые по высшим квалитетам точности, необходимо после сварки подвергать термической обработке (отпуску в нагревательных печах). Особенно необходима высокая точность изготовления в конструкциях с зубчатыми зацеплениями, роторных линиях, гироскопических установках.

4. В зонах сварных соединений некоторых низколегированных сталей происходит процесс замедленного распада аустенитной структуры, вызывающий деформирование соединения в течение некоторого времени. В процессе эксплуатации сварных соединений из низкоуглеродистой и аустенитной стали изменения размеров обычно не происходит. Существуют разные мероприятия для устранения этого вредного явления. Одно из них — применение рациональной термической обработки изделия после сварки. Полезно снятие остаточных напряжений, так как возникающие при этом пластические деформации ускоряют процесс стабилизации структур.

5. Механическую обработку сварных деталей машин следует, как правило, производить после отпуска, так как удаление части сечения вызывает перераспределение остаточных напряжений и искажение ранее обработанных поверхностей. Однако эти искажения зависят от жесткости разрабатываемых деталей, а также размера снимаемого слоя и могут быть невелики. Поэтому очень часто сварные изделия обрабатывают, не производя вовсе отпуска.

6. «Горячий монтаж», т. е. сборку и сварку механически обработанных заготовок без последующей механической обработки готовой детали, можно применять только при тщательной обработке технологии сварки.

Детали машин часто воспринимают действие динамических нагрузок. Это требует проектирования конструкций с возможным устранением концентраторов напряжений. Влияние динамических нагрузок учитывают с помощью коэффициента η.

Расчетное усилие при этом

$$P = P_{\text{пост}} + P_{\text{пол}}\eta, \qquad (14.1)$$

где $P_{\text{пост}}$ — усилие от постоянных нагрузок; $P_{\text{пол}}$ — усилие от полезных нагрузок. Значения η зависят от вида машины и характера ее работы:

Электромашины, шлифовальные станки, роторные компрессорные турбины	1,0...1,1
Двигатели внутреннего сгорания, поршневые насосы и компрессоры	1,2...1,5
Волочильные станки, рычажные прессы, пильные рамы	1,5...2,0
Прокатные станы, камнеломные машины	2,0...3,0

Помимо увеличения заданных значений статических усилий при проектировании деталей машин производится снижение допускаемых напряжений с учетом вибрационного действия на деталь. Это снижение допускаемых напряжений в основном металле производится с учетом комплекса факторов, рассматриваемых в специальных курсах применительно к каждой отрасли техники.

Допускаемые напряжения в сварных соединениях деталей машин снижаются относительно допускаемых напряжений $[\sigma']_р$ путем умножения на коэффициент γ_0, вычисляемый в зависимости от эффективного коэффициента концентрации сварного соединения $K_э$ (см. гл. 5).

Таким образом, площадь расчетного сечения шва при растяжении элементов

$$A_{\text{треб}} = (P_{\text{пост}} + P_{\text{пол}}\eta)/[\sigma']_р\gamma_0. \qquad (14.2)$$

Аналогичным образом определяют момент сопротивления сечения при изгибе:

$$W_{\text{треб}} = \frac{M_{\text{пост}} + M_{\text{пол}}\eta}{[\sigma']_р\gamma_c}, \qquad (14.3)$$

где γ_c — коэффициент снижения допускаемых напряжений.

§ 14.3. БАРАБАНЫ

Барабаны используют в шаровых мельницах, центрифугах, но особенно часто их применяют в грузоподъемных машинах и шахтных подъемниках. Размеры барабанов различны. Диаметры их колеблются в широких пределах: от нескольких десятков миллиметров до нескольких метров. Длина барабана зависит от его назначения. Толщина стенок барабана может достигать 75 мм. В большинстве случаев барабан представляет собой сварную конструкцию, изготовленную из листов. Однако в некоторых изделиях основой барабана служит каркас, выполненный из профильного

материала. Каркас представляет собой пространственную жесткую систему, к которой приваривают барабанную обшивку. Такие конструкции встречаются сравнительно редко и главным образом в крупных шахтных подъемниках.

Цилиндрическую часть барабана соединяют с торцевыми стенками (днищами). Последние представляют собой

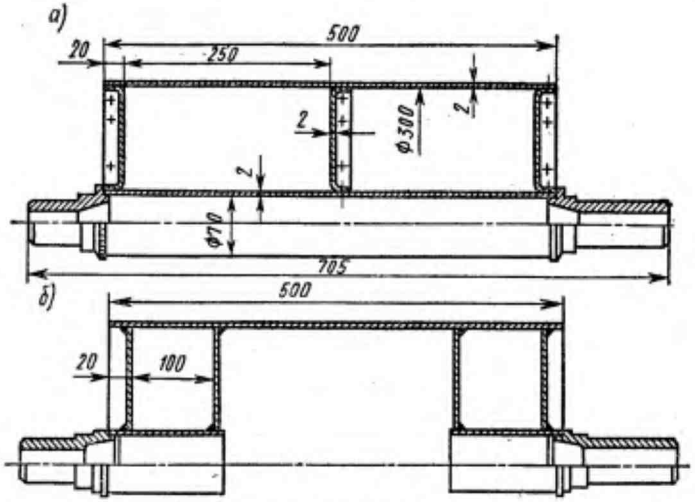


Рис. 14.6. Конструкция сварных барабанов

плоские круглые листовые элементы, к которым приварены цапфы. В некоторых конструкциях барабанов цапфы являются концами валов, не имеющих разрывов (рис. 14.6, *а*); в других — концами валов с разрывом (рис. 14.6, *б*). Для корпусов барабанов малых диаметров используют трубы или отливки, для средних и больших диаметров корпуса барабанов вальцуют из одного или нескольких листов.

Рассмотрим схему конструкции барабана шахтного подъемника. Для удобства навивки каната на поверхности барабана предусматривают канавки, соответствующие диаметру этого каната (рис. 14.7, *а*). Канавки не должны ослаблять сечение барабана. Усилие от натяжения каната вызывает в барабане сжатие. Если напряжения сжатия превзойдут значение, которое называется критическим, то оболочка потеряет устойчивую форму и выпучится (рис. 14.7, *б*).

Во избежание потери устойчивости повышают жесткость оболочки. Для этого приваривают кольцевые элементы

жесткости: полосы, швеллеры (рис. 14.7, *в*), различные штампованные профили.

Соединения барабана с торцевой стенкой весьма ответственны, так как передают значительные рабочие усилия. Рациональными являются соединения барабана со стенкой, приведенные на рис. 14.7, *г*, *е*; допускается соединение угловыми швами, показанное на рис. 14.7, *д*, *е*.

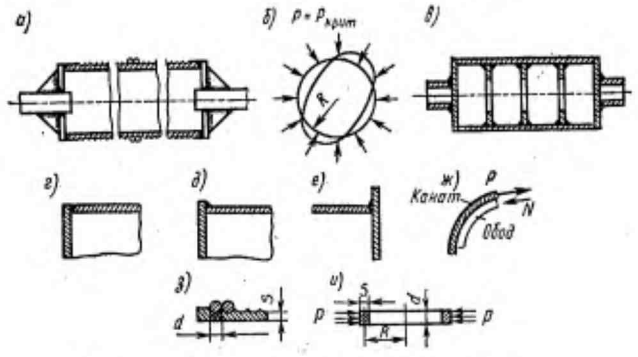


Рис. 14.7. К расчету сварных барабанов:
а — общий вид; *б* — поперечное сечение при потере устойчивости; *в* — усиление кольцевыми ребрами жесткости; *г*, *д*, *е* — соединения цилиндрической части с торцевой стенкой; *ж* — усилия в барабане от натяжения троса; *з* — к определению рабочей толщины стенки; *и* — устойчивость кольца

Расчет прочности барабана производят на сжатие, изгиб и кручение. Рассмотрим элемент обода под канатом (рис. 14.7, *ж*). Усилие в ободе уравновешивает силу P, приложенную к канату. Поэтому напряжение сжатия в ободе

$$\sigma = \frac{P}{ds}, \qquad (14.4)$$

где d — ширина обода, равная диаметру каната; s — толщина обода (рис. 14.7, *з*).

Рассмотрим, в какой степени сжимающие напряжения могут быть опасны для обода с точки зрения потери устойчивости. Допустим, что труба, не имеющая торцевых стенок, сжимается нагрузкой, равномерно распределенной по ее окружности (рис. 14.7, *й*). Из теории упругости известно, что потеря устойчивости наступает при нагрузке

$$p_{кр} = \frac{3EJ}{R^3}, \qquad (14.5)$$

где J — момент инерции продольного сечения стенки трубы относительно оси; E — модуль упругости; R — радиус трубы.

Если принять элемент длины трубы равной d, а толщину стенки — s (рис. 14.7, *з*), то

$$J = \frac{ds^3}{12}. \qquad (14.6)$$

Таким образом, нагрузка определится формулой

$$p_{кр} = Ed(s/R)^3/4. \qquad (14.7)$$

Установим зависимость между P и p. В гл. 13 показано, что в цилиндрическом теле, нагруженном по поверхности распределенной нагрузкой p, образуется усилие

$$N = P = pR. \qquad (14.8)$$

Подставим вместо p его значение из формулы (14.7), тогда получим

$$P_{кр} = \frac{E\,dR\,(s/R)^3}{4}. \qquad (14.9)$$

Если принять коэффициент запаса на устойчивость равным 2, то допускаемая сила по устойчивости барабана

$$P_{доп} = \frac{E\,dR\,(s/R)^3}{8}. \qquad (14.10)$$

Напряжение в барабане, допускаемое с учетом устойчивости, составляет

$$[\sigma]_р \leqslant 0{,}5\,[\sigma]_{кр}. \qquad (14.11)$$

Торцевые стенки повышают устойчивость барабана по сравнению с ее допускаемым значением $P_{доп}$, полученным по формуле (14.10). Если $P_{расч} > 0{,}5P_{кр}$, то барабан следует усилить постановкой кольцевых элементов жесткости.

Пример расчета. Требуется из условия определить необходимую толщину листов барабана, у которого радиус $R=30$ см, $d=2$ см, $P=20$ кН, $E=0{,}21\cdot10^6$ МПа (рис. 14.8).

По формуле (14.10) имеем

$$R/s = \sqrt[3]{EdR/(8P)} = \sqrt[3]{0{,}21\cdot0{,}02\cdot0{,}3\cdot10^6/(8\cdot0{,}02)} = 19{,}6,$$

откуда $s=16$ мм.

Напряжение сжатия в оболочке определяется по формуле (14.4):

$$\sigma_{см} = 0{,}02/(0{,}02\cdot0{,}016) = 62{,}5 \text{ МПа}.$$

Если углубление канавки составляет $d/2=10$ мм, то полная толщина листа барабана равна $16+10=26$ мм.

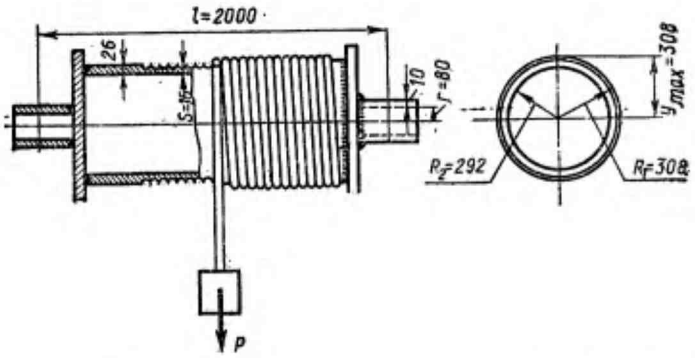


Рис. 14.8. К примеру расчета прочности сварного барабана

Кроме проверки на устойчивость оболочка должна быть проверена также на прочность в зависимости от изгибающего и крутящего моментов. Наибольший изгибающий момент имеет место в середине пролета (см. рис. 14.8):

$$M = Pl/4, \qquad (14.12)$$

где l — расстояние между опорами барабана. Напряжение от изгиба

$$\sigma = M/W. \qquad (14.13)$$

Момент сопротивления барабана находится так же, как и в кольцевом сечении:

$$W = J/R_1, \qquad (14.14)$$

где R_1 — внешний радиус.

Значение крутящего момента зависит от конструкции привода. При расположении его с одного конца вала

$$M_{кр} = PR. \qquad (14.15)$$

Напряжение от кручения

$$\tau_{кр} = M_{кр}/W_{кр}, \qquad (14.16)$$

где $W_{кр}$ — полярный момент сопротивления.

В большинстве случаев напряжения от изгиба и кручения в барабанах незначительны по сравнению с напряжениями сжатия.

Пример расчета. Допустим, что длина барабана, рассмотренного в предыдущем примере, $l=2000$ мм. Остальные условия те же.

Определим момент, вызванный в барабане изгибом,

$$M = Pl/4.$$

Крутящий момент в случае, если двигатель находится с одной стороны вала, составит

$$M_{кр} = PR \leqslant 20 \cdot 0{,}3 = 6 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Осевой момент инерции кольца

$$J = \pi (R_1^4 - R_2^4)/4.$$

Принимаем для упрощения расчета $R_1 = R_2 + s$. Тогда $J = \pi/4\ (4 \cdot 29{,}2^3 \cdot 1{,}6 + 6{,}29 \cdot 2 \cdot 1{,}6^3 + 1{,}6^4) = 135\,740$ см^4.
Напряжение от изгиба по формуле (14.13)

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{0{,}01 \cdot 0{,}308}{135\,740 \cdot 10^{-8}} = 2{,}3 \text{ МПа}.$$

Полярный момент инерции $J_{кр} = 2J = 271\,480$ см^4. Напряжение от кручения по формуле (11.16) $\tau = 0{,}006 \cdot 0{,}308/(271\,480 \cdot 10^{-8}) = 0{,}67$ МПа. Напряжения ничтожно малы.

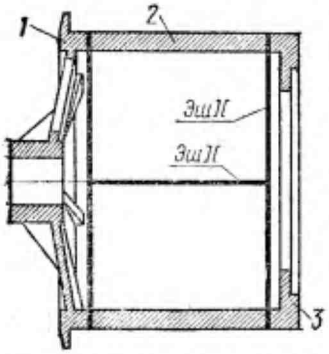


Рис. 14.9. Сварной барабан лебедки шагающего экскаватора

Допустим, что внутренний радиус цапфы $r = 8{,}0$ см и толщина ее $s_y = 1{,}0$ см. Полярный момент инерции поперечного сечения цапфы

$$J_{p_ц} = \pi \left[(r_1 + 1{,}0)^4 - r_1^4\right]/2 = 3864 \text{ см}^4.$$

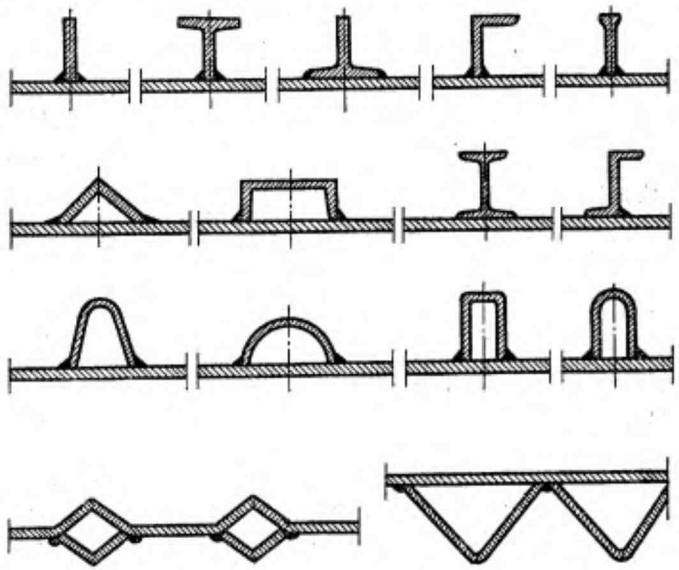
Напряжение от кручения в цапфе и в шве, соединяющем цапфу с торцевой стенкой, при $K = 6$ мм, $\tau = 14$ МПа, что вполне допустимо.

В крупногабаритных барабанах успешно применяют соединения, свариваемые электрошлаковой сваркой. На рис. 14.9 изображена сварная конструкция барабана лебедки шагающего экскаватора. Толщина его стенок 98 мм, наружный диаметр 1986 мм. Ступица барабана *1* и фланец *3* представляют собой отливки из стали 25Л. Полуобечайки *2* изготовлены из стали 20Г. Отливки *1* и *3* перед механической обработкой подвергаются термической обработке. После выполнения сварочных работ весь барабан снова подвергается термической обработке.

§ 14.4. КОРПУСА РЕДУКТОРОВ

Сварные корпуса редукторов представляют собой жесткую коробчатую конструкцию. Такие конструкции получаются значительно легче, чем литые, так как стенки могут быть более тонкими, усиленными элементами жесткости, как показано на рис. 14.10. Масса литых корпусов почти в два раза больше, чем сварных. При индивидуальном и мелкосерийном производстве сварные корпуса редукторов оказываются экономичные литых.

Корпуса редукторов требуют точного изготовления, поэтому после сварки их подвергают отпуску. Механическая обработка производится после отпуска. В СССР выпускают редукторы со сварными корпусами, передающие весьма


Рис. 14.10. Усиление вертикальных стенок редуктора

большие мощности (свыше 700 кВт). Эти редукторы применяют в прокатных станах металлургических заводов. При изготовлении используют прокатные элементы, гнутые и штампованные профили.

Пример расчета. Требуется определить напряжения в корпусе двухступенчатого редуктора мощностью $N = 147$ кВт при $n_1 = 540$ об/мин и $n_2 = 30$ об/мин. Общий вид, размеры и схема расположения шестерен приведены на рис. 14.11, *а*.

Усилие на зуб в первой паре шестерен при $M_1 = 9740/n$ Н·м, где N — мощность, выраженная в кВт, определяется как $T_1 = M_1/r_1 = 33{,}2$ кН, здесь $r_1 = D_1/2 = 8$ см.

Усилие на зуб шестерни при наличии вращения, указанном на рисунке, направлено вверх. Усилие на каждый подшипник вала

$$R_1 = \frac{T_1}{2} = 16{,}6 \text{ кН}.$$

Усилие на зуб колеса на валу *II* равно 33,2 кН и направлено вниз. Усилие на зуб в каждой из пары шестерен при вращении вала *II* направлено также вниз. Частота вращения вала *II* $n_2=540/4=135$ об/мин, поэтому при радиусе $r_3=D_3/2=10$ см, $T_2=53{,}00$ кН.

Так как шестерни расположены симметрично, то усилие на подшипник вала *II* составляет

$$R_2=R_1+T_2=69{,}6\text{ кН}.$$

Усилие на подшипник *III*, обозначенное через R_3, направлено вверх и равно 53 кН. От указанных сил R_1, R_2 и R по длине корпуса построены эпюры Q и M (рис. 14.11, *б*) с учетом того, что редуктор опирается на основание в точках A и B. Расчетный момент $M=13{,}94$ кН·м, расчетная сила $Q=38{,}4$ кН.

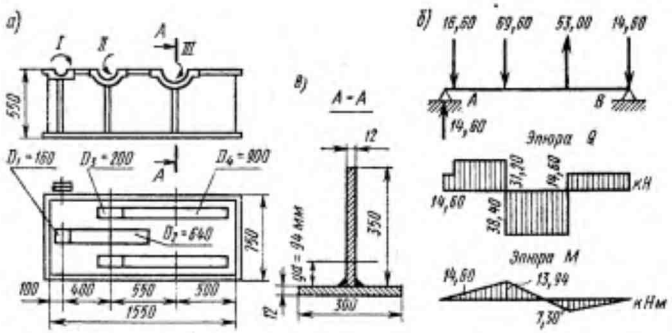


Рис. 14.11. К примеру расчета корпуса двухступенчатого редуктора

Принимаем, что изгибаемый элемент (рис. 14.11, *в*) включает боковую стенку и часть днища, симметричную относительно стенки. Определим его центр тяжести:

$$y_a=\frac{35\cdot1{,}2\cdot17{,}5-30\cdot1{,}2\cdot0{,}6}{35\cdot1{,}2+30\cdot1/2}=9{,}4\text{ см}.$$

Момент инерции сечения заштрихованной площади

$$J=\frac{35^3\cdot1{,}2}{12}+35\cdot1{,}2\,(17{,}5-9{,}4)^2+\frac{30\cdot1{,}2^3}{12}+30\cdot1{,}2(9{,}4+0{,}6)^2=$$
$$=10\,642\text{ см}^4.$$

Момент сопротивления сечения $W=10\,642/(35-9{,}4)=416$ см^3. Напряжение $\sigma=M/W=41{,}1$ МПа. Статический момент площади днища относительно центра тяжести сечения $S=30\cdot1{,}2(9{,}4+0{,}6)=360$ см^3. Касательные напряжения в швах при $\beta=1{,}0$ и $K=8$ мм

$$\tau=\frac{Q\cdot S}{2J\beta K}=\frac{0{,}0384\cdot360\cdot10^{-6}}{10^{-8}-10\,642\cdot2\cdot1{,}0\cdot8\cdot10^{-3}}=8{,}1\text{ МПа}.$$

§ 14.5. ШЕСТЕРНИ И ШКИВЫ

Конструкции сварных шестерен, шкивов и маховиков имеют много общего. Их основными частями являются обод, ступица и соединительные элементы, связывающие обод со ступицей. Соединительными элементами служат спицы или сплошные центры. Рассмотрим конструкции сварных шестерен и шкивов.

На рис. 14.12, *а* приведен пример легкого шкива с центром и ободом из уголка; на рис. 14.12, *б* — шкив с ободом

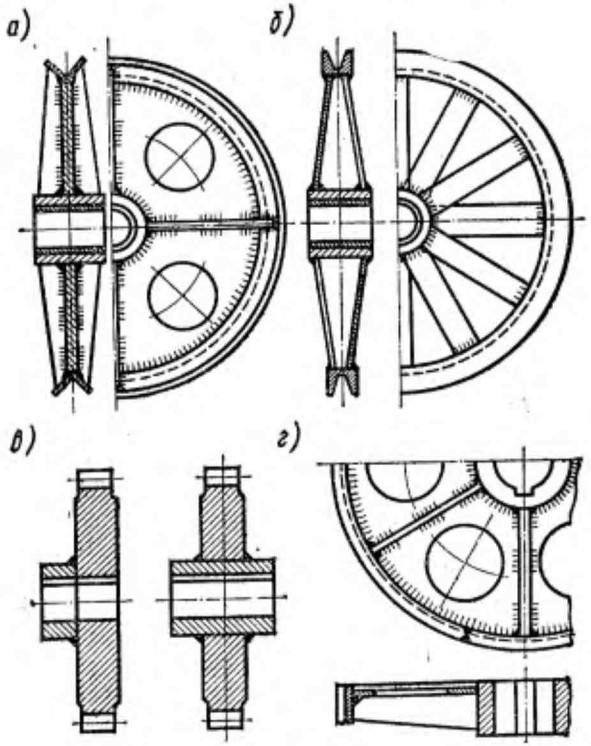


Рис. 14.12. Сварные шестерни и шкивы

из швеллера со спицами из полосовой стали; на рис. 14.12, *в* — зубчатые колеса со сплошным центром; на рис. 14.12, *г* — зубчатые колеса с ободом, сваренным стыковым соединением. Внутренний диаметр ступицы обычно соответствует диаметру вала. В качестве спиц могут быть использованы трубчатые элементы, тавровые, двутавровые и различные

штампованные профили. Ободья шестерен большого размера прежде изготовляли литыми или коваными, в настоящее время их в большинстве случаев вальцуют из толстых листов и сваривают встык. Центр и ребра изготовляют из низкоуглеродистой стали. Для ободьев применяют повышенные сорта кованой и вальцованной стали, например сталь 30ХГСА, а также углеродистые стали 35, 45 и др.

Швы, приваривающие центр к ступице и к ободу, целесообразно выполнять с подготовкой кромок или с глубоким проплавлением (рис. 14.13, *а*). При этом концентрация напряжений в соединениях оказывается меньше, а следовательно, прочность при переменных нагрузках больше, чем в конструкции с угловыми швами (рис. 14.13, *б*).

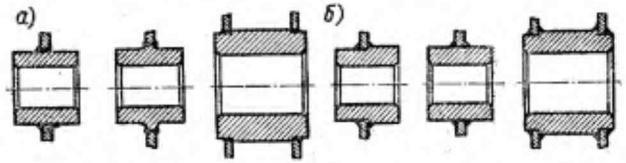


Рис. 14.13. Сварные соединения дисков со ступицами

Центр представляет собой весьма ответственную часть конструкции шестерни. При недостаточной его жесткости во время эксплуатации возникают вибрации, которые могут расстроить зубчатое зацепление. Поэтому центры иногда конструируют двустенчатыми (см. рис. 14.13). Между стенками полезно ставить диафрагмы жесткости. Жесткость двустенчатой шестерни значительно выше, чем одностенчатой. После сварки шестерни подвергают термической обработке (отпуску) в печи для снятия остаточных напряжений. После отпуска производят механическую обработку и нарезку зубьев.

Подобным же образом конструктивно оформляют шкивы и маховики. Они не требуют столь большой точности изготовления и стабильности размеров, как шестерни. Поэтому, как правило, после сварки эти конструкции не подвергают отпуску.

Расчет прочности сварного шкива производят по касательному усилию, приложенному к ободу. Усилие T передается на обод, с обода на ступицу (или на вал) через спицы или центр. Если число спиц менее четырех, то считают, что усилие T воспринимается полностью одной спицей. Таким образом, в спице возникают поперечная сила $Q=T$ и изгибающий момент $M=Tl$ (рис. 14.14, *а*. . .*в*). Напряжение от

изгиба в спице определяется по формуле

$$\sigma=(M/J)y_{max}, \qquad (14.17)$$

где J — момент инерции поперечного сечения спицы относительно оси x (рис. 14.14, *г*).

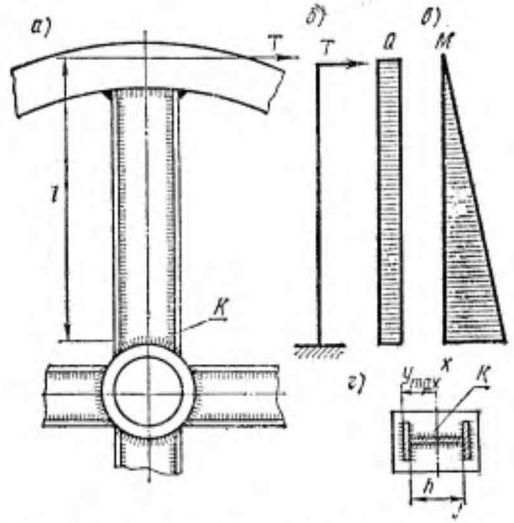


Рис. 14.14. К расчету сварных соединений шкива со спицами:

а — шкив; *б*, *в* — эпюры силы Q и момента M по длине спиц; *г* — соединение спицы со ступицей

Следует определить касательные напряжения в швах спицы, соединяющих ее пояс со стенкой. Если швы угловые с катетом K, то напряжения в них от поперечной силы

$$\tau=\frac{QS}{2J\beta K}. \qquad (14.18)$$

Касательные напряжения τ, определяемые по формуле (14.18), обычно незначительны. В месте соединения спицы со ступицей следует определить напряжения в угловых швах от момента:

$$\tau_M=\frac{M(y_{max}+K)}{J_c}, \qquad (14.19)$$

где J_c — момент инерции периметра шва относительно вертикальной оси.

Напряжение от поперечной силы проверяется только с учетом швов, приваривающих стенку профиля:

$$\tau_Q = Q/A_c, \qquad (14.20)$$

где $A_c = 2h\beta K$.

Напряжения в соединениях спиц со ступицей от силы Q обычно бывают малы. Прочность в основном определяется напряжением от момента.

Если число спиц $n > 4$, то

$$M < Tl; \qquad (14.21)$$

$$q < T. \qquad (14.22)$$

В конструкциях сварных шестерен (рис. 14.15, *а*) с центрами вместо спиц наиболее нагруженными являются

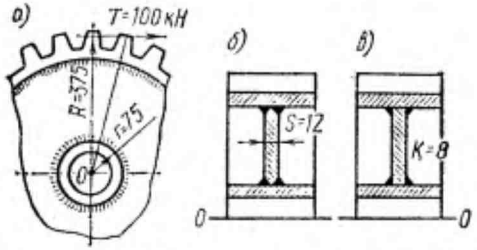


Рис. 14.15. К расчету сварных соединений шестерен со сплошным центром:
а — шестерня; *б* — соединение центра со ступицей и ободом, с подготовкой кромок; *в* — то же, без подготовки кромок

швы, соединяющие центр со ступицей. Они воспринимают усилие T и крутящий момент

$$M = TR. \qquad (14.23)$$

Напряжение в соединении ступицы с центром определяется в предположении, что касательные напряжения распределены равномерно по длине шва; на участке длиной, равной единице, усилие в шве с подготовкой кромок (рис. 14.15, *б*) создает момент

$$m = s\tau r. \qquad (14.24)$$

Полный момент

$$M = 2m\pi r = 2\pi r^2 s\tau. \qquad (14.25)$$

Напряжение в шве с подготовкой кромок

$$\tau = \frac{M}{2\pi r^2 s}. \qquad (14.26)$$

Напряжение в угловых швах (рис. 14.15, *в*) с катетом K

$$\tau = \frac{M}{4\pi r^2 \beta K}. \qquad (14.27)$$

Пример расчета. Касательное усилие на зубе $T = 100$ кН, радиус шестерни $R = 375$ мм, радиус ступицы $r = 75$ мм. Определить напряжения в соединении центра ($s = 12$ мм) со ступицей (рис. 14.15, *а*). По формуле (14.23) $M = 37{,}5$ кН·м.

В швах, соединяющих центр со ступицей, сваренных с подготовкой кромок, $\beta = 1$ и касательные напряжения определяются по формуле (14.26):

$$\tau = \frac{0{,}0375}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}75^2 \cdot 0{,}012} = 88 \text{ МПа}.$$

§ 14.6. СВАРНЫЕ РАМЫ

Рамы входят в состав различных машин и конструкций — станков, вагонов, крановых тележек, фундаментов, кузнечно-прессовых и прокатных машин, автомобилей, тракторов, в металлические конструкции зданий. Рамы и станины служат для связи в одно целое отдельных частей

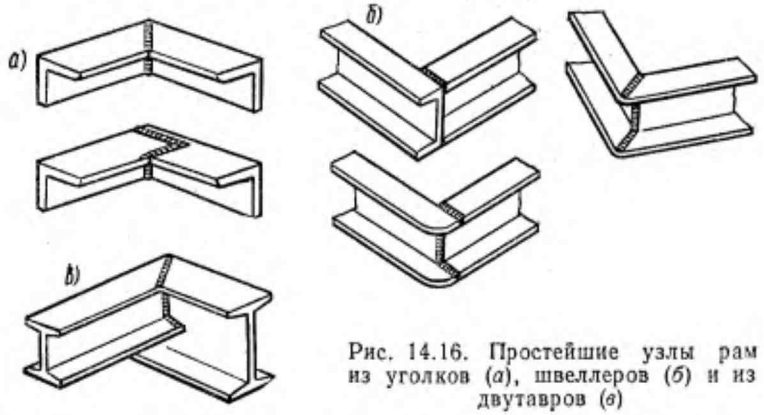


Рис. 14.16. Простейшие узлы рам из уголков (*а*), швеллеров (*б*) и из двутавров (*в*)

механизма или станка. Они должны обеспечивать необходимую жесткость и прочность конструкции и удовлетворять требованиям рациональной компоновки изделия. При расчетах на прочность рамы и станины представляют в виде системы соединенных балок.

Простейшие узлы сварных рам приведены на рис. 14.16, *а*. . .*в*. Для увеличения жесткости рам в горизонтальной плоскости рекомендуется ставить распорки. В целях снижения массы при сохранении жесткости целе-

сообразно применять для легких рам тонкостенные гнутые штампованные уголки, швеллеры и другие профили. Для соединения указанных элементов применяют не только дуговую, но и контактную сварку. Так, например, лонжероны — продольные балки сварной рамы автомобиля — выполняют из штампованного швеллера, а поперечные — из элементов замкнутого трубчатого сечения. Привариваются они к

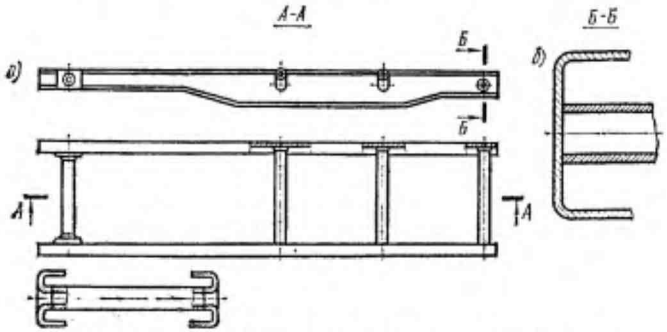


Рис. 14.17. Сварная рама грузового автомобиля

к лонжеронам контактной сваркой тавровыми соединениями (рис. 14.17, *б*), а при выштамповке и отбраковке лонжеронов — стыковыми (рис. 14.17, *а*). Несмотря на резкий переход в сечении трубчатой конструкции к лонжерону, сварная конструкция по прочности превосходит клепаную.

Пример расчета. Требуется определить прочность рамы (рис. 14.18, *а*) при следующих условиях: средние поперечные балки *2* двутаврового профиля пролетом $l=1$ м нагружены по длине равномерной нагрузкой $q=60$ кН/м (рис. 14.18, *б*); собственным весом балок пренебрегают. Продольные балки *1* имеют коробчатое сечение. Они обладают большой жесткостью на кручение, поэтому поперечные балки можно считать защемленными в продольных

$$M=ql^2/12=60\cdot1^2/12=5{,}0\ \text{кН}\cdot\text{м}.$$

Момент инерции поперечной балки по сечению *Б—Б* составит

$$J=20^3\cdot1/12+2\,(16\cdot1\cdot10{,}5^2+1^3\cdot16/12)=4197\ \text{см}^4.$$

Момент сопротивления поперечной балки

$$W=4197/11=381\ \text{см}^3.$$

Напряжения в поперечной балке

$$\sigma=M/W=0{,}005/(381\cdot10^{-6})=13{,}1\ \text{МПа}.$$

Поперечная сила в балке

$$Q=ql/2=60\cdot1/2=30\ \text{кН}.$$

Статический момент горизонтального листа относительно центра тяжести сечения

$$S=16\cdot1\cdot10{,}5=168\ \text{см}^3.$$

Касательные напряжения в поясных швах с катетом $K=6$ мм поперечной балки к опоре при $\beta=1{,}0$ составят

$$\tau=QS/(2J\beta K)=0{,}03\cdot168\cdot10^{-6}/(4197\cdot10^{-8}\cdot2\cdot1{,}0\cdot0{,}006)=15{,}6\ \text{МПа}.$$

Прикрепление поперечных балок к продольным спроектировано следующим образом. Кромки горизонтальных листов поперечной

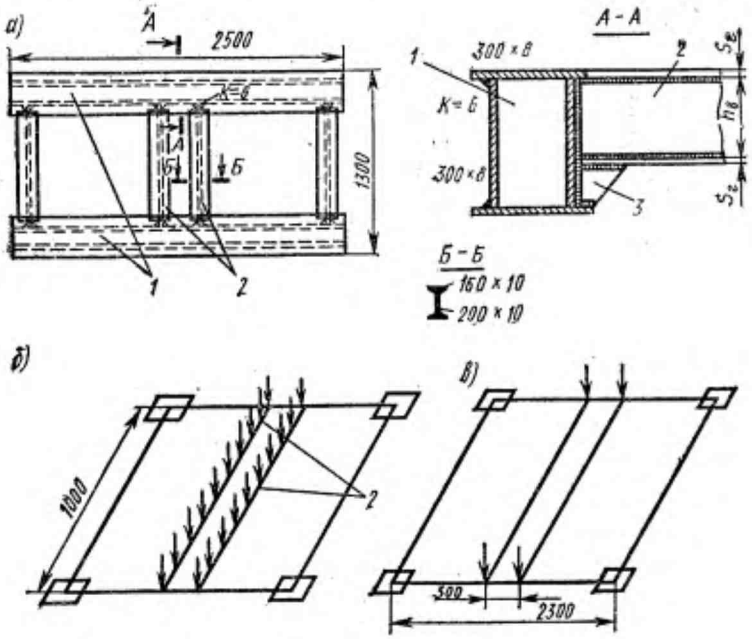


Рис. 14.18. К примеру расчета рамы

балки скошены и приварены стыковым соединением. Вертикальная стенка обварена угловыми швами с катетом $K=6$ мм. В прикреплении предусмотрена косынка *3* (рис. 14.18, *а*). При определении напряжений учитываем в соединении только стыковые и вертикальные угловые швы. Швы, приваривающие косынку *3*, в учет не принимаем. Момент, воспринимаемый двумя стыковыми горизонтальными швами, определяется по формуле

$$M_{ст}=\sigma A_г\,(h_в+s_г), \qquad (14.28)$$

где $A_г$ — площадь сечения горизонтального листа,

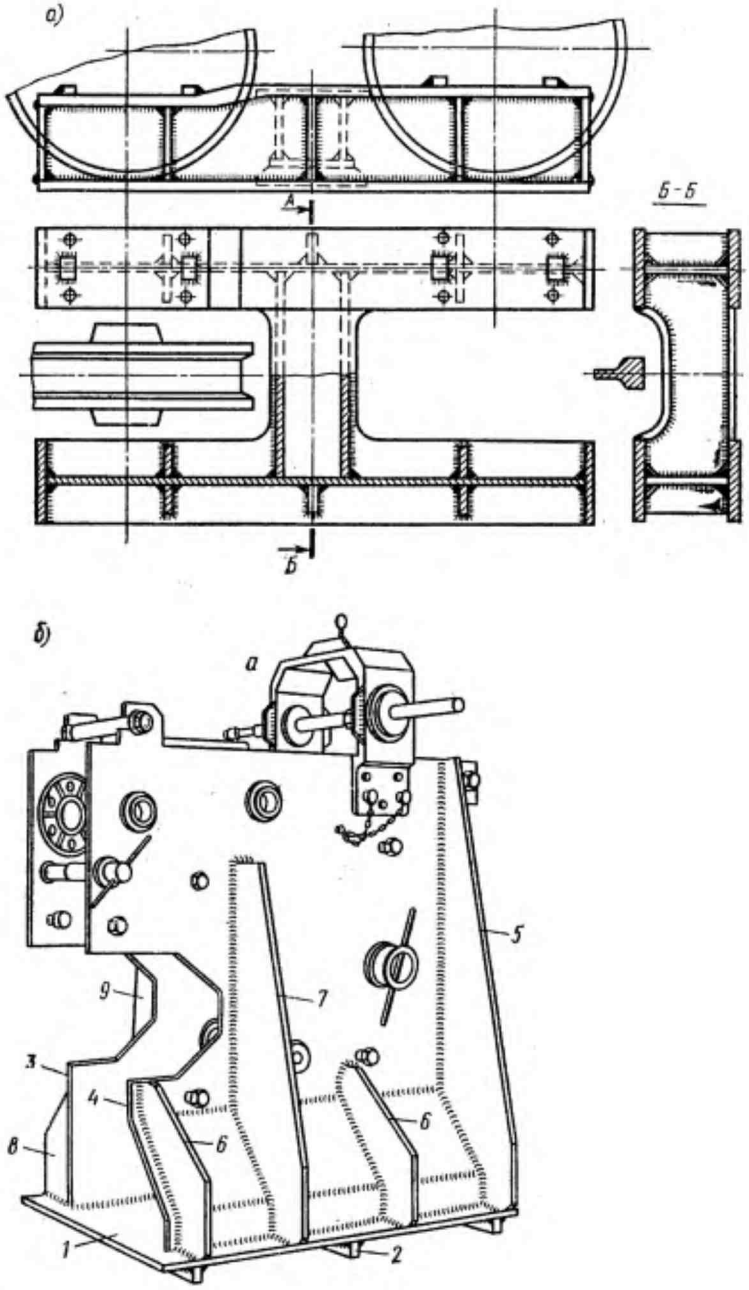
Момент, воспринимаемый двумя вертикальными угловыми швами,

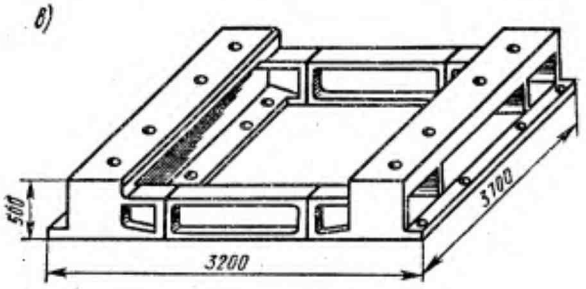
$$M_в = 2\tau\beta K h_в^2. \qquad (14.29)$$

Расчетный момент вычисляется по формуле

$$M = \sigma A_г (h_в + s_г) + 2\tau\beta K h_в^2/6. \qquad (14.30)$$

Примем в запас прочности, что σ по значению равно τ. При этом





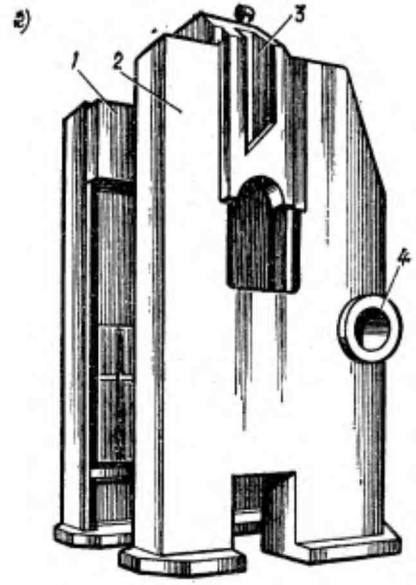


Рис. 14.19. Примеры сварных деталей машин:

а — сварная конструкция рамы тележки вагона; *б* — сварная рама механических ножниц; *в* — сварная плита обжимной клети стана Дуо; *г* — сварная станина пресса

касательное напряжение при $\beta=0{,}8$

$$\tau=\frac{M}{A_г(h_в+s_г)+2\beta K h_в^2/6}=\frac{0{,}005\cdot10^6}{16\cdot1\,(20+1)+2\cdot0{,}870\cdot6\cdot20^2/6}=$$
$$=12{,}5\ \text{МПа}.$$

Продольные балки рассчитывают по схеме рис. 14.18, *в*.

В сварных конструкциях рам применяются сопряжения балок разного типа. Расчетным усилием для них, как правило, является изгибающий момент. Если момент не может быть определен на основе статического расчета, то соединение целесообразно конструировать равнопрочным основному сечению изгибаемых элементов. При этом расчетный момент

$$M=[\sigma]_р W, \qquad (14.31)$$

где W — момент сопротивления поперечного сечения прикрепляемого элемента; $[\sigma]_р$ — допускаемое напряжение. Условие прочности сопряжений можно записать различными способами, необходимо только отразить условие, что сумма моментов внутренних сил, допускаемых при расчете прочности соединения, равна или больше расчетного момента M.

В рамных конструкциях нередко используются траверсы, которые отличаются от балок значительно меньшими пролетами и более сложными профилями поперечных сечений. Поперечные сечения траверс часто состоят из двух толстых плит (поясов) и заполнения из переборок меньшей толщины. Примеры сварных конструкций приведены на рис. 14. 9, *а*. . .*г*.

§ 14.7. СВАРНЫЕ ДЕТАЛИ АВТОМОБИЛЕЙ

Карданный вал автомобиля — весьма ответственная деталь, так как его поломка приводит к аварии. Сварные соединения вилки *1* и шлицевой втулки *2* с карданной трубой *3* (рис. 14.20, *б*) осуществляют сваркой трением. Учитывая возможность перегрузки, расчетный крутящий момент определяют по формуле

$$M_{кр}=(1{,}5\ldots2,\ о)\,M_д i, \qquad (14.32)$$

где $M_д$ — момент двигателя; i — передаточное число трансмиссии.

Напряжение в сварном шве от момента

$$\tau_{кр}=\frac{M_{кр}}{W_{кр}}=\frac{2M_{кр}r_1}{\pi(r_1^4-r_2^4)}, \qquad (14.33)$$

где r_1 и r_2 — соответственно внешний и внутренний радиусы кольцевого сечения.

По III теории прочности

$$\sigma_{экв}=2\tau_{кр}\leqslant\sigma_{тек}\varphi/n, \qquad (14.34)$$

где φ зависит от диаметра вала (при $d=30$ мм, $\varphi=0{,}85$; при $d=100$ мм, $\varphi=0{,}76$); $n=1{,}5$. . .$2{,}0$, если $\sigma_т/\sigma_в=0{,}6$. . .

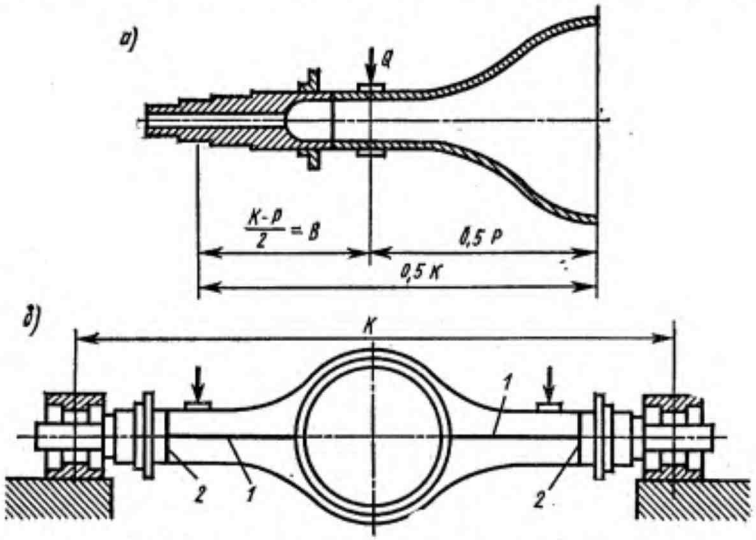


Рис. 14.20. Картер ведущего моста грузового автомобиля

0,85 и $n=1{,}15$. . .$1{,}6$, если $\sigma_т/\sigma_в=0{,}45$. . .$0{,}6$. Сварные соединения, выполненные сваркой трением, оказываются равнопрочными основному металлу вилки кардана.

Ведущий мост в автомашинах с зависимой подвеской рассматривается в качестве пустотелой балки, связывающей колеса (рис. 14.20, *а*). В сечении, совпадающем с осью рессор, изгибающий момент с учетом динамического коэффициента

$$M_и=(2\ldots2{,}5)\,Q_0 B, \qquad (14.35)$$

где Q_0 — нагрузка на шину колеса; B — полуразность расстояния K между колесами и расстояния P между рессорами (рис. 14.20, *а*).

Расчетное $\sigma=100$ МПа.

Для грузового автомобиля ЗИЛ-130 нагрузка на шину с учетом динамики $Q=34{,}75$ кН, $B=387$ мм. Момент $M_и=13{,}45$ кН·м, $W=144$ см$^{-3}$, $\sigma=93{,}2$ МПа.

Таким образом, для картера, например из стали 17ГС с пределом текучести $\sigma_{тек}=320$ МПа, запас прочности $n=\sigma_{тек}/\sigma=3{,}43$. Продольные сварные швы *1* (рис. 14.20, *б*), соединяющие штампованные половинки балки картера, являются связующими и не рассчитываются. Наиболее нагружены сварные соединения *2* цапф с балкой картера, их выполняют сваркой трением.

§ 14.8. СВАРНЫЕ ДЕТАЛИ ТУРБИН

Паровые турбины работают при температуре до 550 °С и при давлении пара до 24 МПа. При температурах эксплуатации $T_{экс}\geqslant 400$ °С применяют низкоуглеродистые стали; при $T_{экс}>400$ °С — хромомолибденовые, хромованадиевые стали. Хорошо свариваются жаропрочные аустенитные стали 12Х18Н10Т. Корпуса газовых турбин нагреваются до температуры 800 °С, корпуса камер сгорания — до 1000. . .1050 °С. Их изготовляют из сплавов 20Х23Н18, ХН78Т. Для обеспечения надежности изделий стали подвергают предварительному переплаву, например электрошлаковому или вауумно-дуговому. Дуговая сварка производится электродной проволокой, близкой по составу к основному металлу.

Сварные конструкции из проката в отдельных случаях подвергаются высокому отпуску. Сварные конструкции из отливок проходят термическую обработку всегда. Все наиболее нагруженные соединения — стыковые; в менее нагруженных деталях допускаются нахлесточные.

Коэффициенты запаса прочности $n=\dfrac{\sigma_т}{\sigma_{расч}}$ в узлах турбин устанавливаются следующие:

Цилиндры и корпуса	1,65
Сварные роторы	2,30
Сварные диафрагмы	1,65
Лопатки	1,25

При расчете прочности лопаток учитывается знакопеременное усилие.

Сварные роторы дискового типа показаны на рис. 14.21, *а*; барабанного — на рис. 14.21, *б*; с приваренными полувалами — на рис. 14.21, *в*. На рис. 14.22 показана схема расчета роторов с одним диском, подверженных

нагрузке от центробежных сил. Диск разделяется на три части: полый цилиндр *2*, внутренний диск *1*, наружный диск *3*. Нагрузка от лопаток на внешний диск обозначается P_3; усилие между наружным диском и цилиндром — P_2;

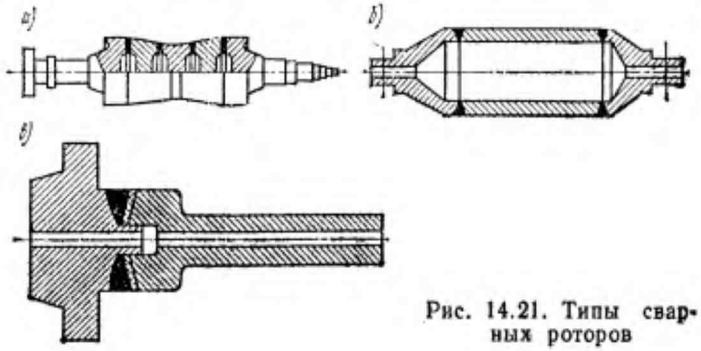


Рис. 14.21. Типы сварных роторов

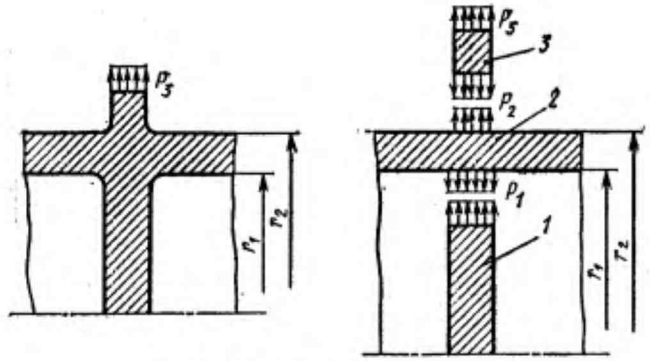


Рис. 14.22. Расчетная схема ротора

между цилиндром и внутренним диском — P_1. Представленная на рис. 14.22 система имеет две степени статической неопределимости. Ее решение базируется на двух уравнениях деформации. Введем обозначения: $u_{диск}$ — радиальное перемещение наружной поверхности внутреннего диска от нагрузки P_1, центробежных нагрузок и неравномерной температуры; $u_{цил_2}$ — радиальное перемещение внутренней поверхности цилиндра на участке сопряжения с диском от нагрузок P_1 и P_2, центробежной силы, неравномерной температуры; $u_{диск_2}$ — радиальное перемещение внутренней поверхности наружного диска от указанных нагрузок и температуры.

Условия деформации

$$u_{\text{диск}_1} = u_{\text{цил}_1}; \qquad (14.36)$$

$$u_{\text{диск}_2} = u_{\text{цил}_2} \qquad (14.37)$$

позволяют разрешить статическую неопределенность.

От всех указанных сил и температуры определяют напряжения во всех элементах ротора. Если ротор конструируется многодисковым, схема расчета остается прежней.

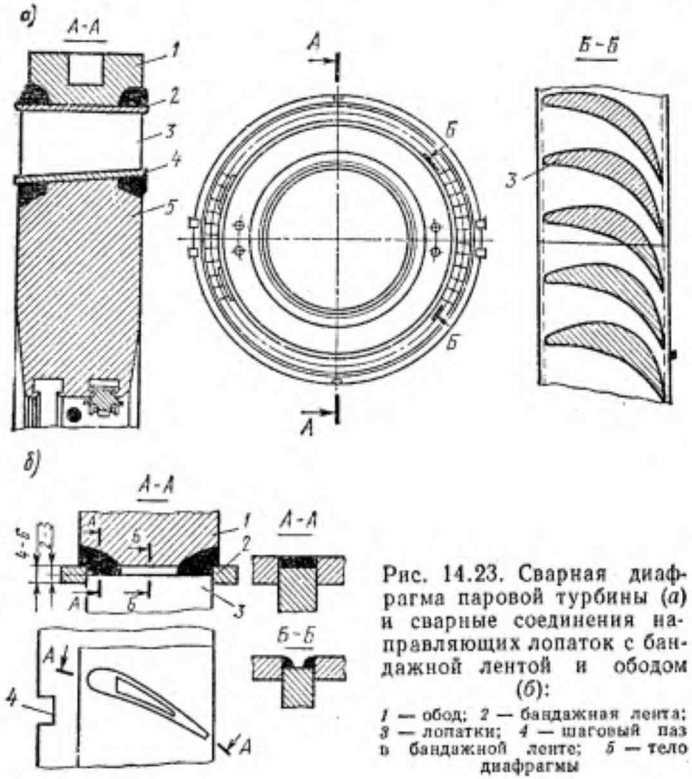


Рис. 14.23. Сварная диафрагма паровой турбины (*а*) и сварные соединения направляющих лопаток с бандажной лентой и ободом (*б*):

1 — обод; *2* — бандажная лента; *3* — лопатки; *4* — шаговый паз в бандажной ленте; *5* — тело диафрагмы

Сварные конструкции роторов имеют преимущества перед цельнокованными; их можно изготовлять из отдельных поковок относительно небольших размеров, применять разнородные металлы; для дисков — высококачественную сталь; для кольцевых частей — перлитную.

В паровых турбинах (рис. 14.23, *а*, *б*) сварная диафрагма состоит из обода *1*, нижней *4* и верхней *2* бандажных лент, тела диафрагмы *5*, направляющих лопаток *3*.

Точность изготовления диафрагм очень высокая во избежание потери мощности. Допуск на шаг лопаток составляет $\pm 0{,}15$ мм. Предъявляются высокие требования к погрешности угла поворота лопаток. Как правило, лопатки устанавливаются в пазы бандажных лент с углублением 2. . .3 мм и привариваются к ним угловыми швами.

Сварные конструкции применяются широко также в гидромашиностроении при изготовлении рабочих колес радиально-осевых и ковшовых турбин, лопастей рабочих колес, спиральных камер, при изготовлении секторов и сварных лопаток направляющих аппаратов.

В § 14.3. . .14.7 были рассмотрены примеры расчета деталей машин, работающих при отсутствии циклических нагружений существенной величины.

Однако в ряде случаев в эксплуатации детали подвергаются постоянно действующим циклическим нагружениям, определяющим прочностные характеристики. При этом их работоспособность деталей определяется усталостными напряжениями — наличием необходимого запаса прочности при явлениях усталости.

Установление методов расчета на усталостную прочность деталей машин зависит от ряда факторов: характера работы, материала, маштабного фактора обработки поверхности детали.

§ 14.9. НАДЕЖНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Детали машин являются составной частью машины. Основное современное требование к машине — надежность ее работы при эксплуатации.

Надежность базируется на доброкачественном материале, передовых технологических методах обработки, методах защиты изделия от коррозии, эрозии, на неразрушающем контроле качества.

Эффективны бислойные материалы; корпусные стали обыкновенного качества, плакированные аустенитом; низколегированные стали с введением в них мягких слоев, тормозящих развитие случайно образовавшихся трещин, в частности при плакировании взрывом. Целесообразен поверхностный наклеп, повышающий предел текучести, использование квазислойных материалов, обладающих промежуточными свойствами между монолитными и составными.

Большую роль играют в деталях машин композитные материалы, состоящие из полимерной матрицы с укреплением ее углеродистыми и стеклянными волокнами, или

алюминиевые — с введением в нее металлических волокон. Композитные материалы приносят большую пользу в отношении борьбы с эффектом вибрации, а также в робототехнике.

Повышение надежности машин достигается применением методов оптимального проектирования на базе САПР при объединении средств автоматической обработки проектной информации на мини-ЭВМ, с задачами обобщения, решаемых на макроЭВМ.

Создаются методы оценки опасности напряженных состояний на разных стадиях на основе акустической эмиссии. Используются вероятностные методы расчета надежности и долговечности.

Обеспечение повышения надежности и одновременно качества достигается тщательно проработанным проектированием, осуществляемым с помощью вычислительных машин.

Задача решается составлением нескольких вариантов с учетом, как правило, нескольких параметров (критериев) качества.

Если количество критериев велико, то отыскание в проектировании оптимального решения для проектируемого объекта или даже детали не автоматизированными методами становится весьма затруднительным.

Решение задачи об оптимизации конструкции осложняется тем, что улучшение одних критериев вызывает ухудшение других. Например, улучшение критерия уменьшения массы конструкции почти всегда сопровождается ухудшением критерия повышения ее жесткости, и количество таких комбинаций, возможных сочетаний критериев, улучшающих и ухудшающих качество, растет интенсивно с увеличением их числа.

Использование ЭВМ позволяет учитывать влияние большого количества критериев на качество и надежность согласно требованиям условий эксплуатации при наличии их возможных противоречий. ЭВМ открывает возможность нахождения главных параметров, обнаружить несущественное влияние других и, наконец, сформулировать интегральный обобщающий критерий, определяющий возможный оптимум объекта.

Всегда следует иметь в виду, что машины высокой надежности должны удовлетворять требованиям экологии и охраны труда.

Повышение надежности машин осуществляется нередко комплексными методами на современных установках, созданных, в частности, в Институте машиноведения АН СССР, позволяющие одновременно изучать структуры и механические свойства материалов в диапазоне от — 50 °С до высоких температур.

Особо следует всесторонне повышать надежность машин, работающих в условиях переменных, низко- и высокочастотных нагружений, а также при ударах, нередко являющихся источником первичных трещин.

В настоящее время правильное решение задачи надежности получается рациональным выбором материалов — сталей, цветных сплавов, неметаллических материалов, например пластмасс, непосредственно удовлетворяющих главным требованиям обеспечения надежной работы конструкции при непрерывном контроле качества в условиях эксплуатации.

Большое влияние на надежную работу в эксплуатации оказывает микрогеометрия поверхности материалов, в особенности при необходимости борьбы с износом. С этой целью следует предуматривать операции повышения сопротивляемости ему путем анодирования, лазерного облучения, напыления и т. д.

Контрольные вопросы к главе 14

1. Назовите примеры объектов машиностроения с применением сварных соединений.
2. Какие специфические требования предъявляются к сварным деталям машин помимо прочности?
3. Какие материалы и виды заготовок применяют в сварных деталях машин?
4. Какое влияние оказывает объем производства на применение сварных соединений в деталях машин?
5. Какое значение имеет в деталях машин наплавка?
6. Какие виды сварочных процессов помимо традиционных применяются в сварных деталях машин?
7. В каких целях особенно необходима точность изготовления?
8. Для чего необходим отпуск сварных деталей машин?
9. Изобразите типичные формы рамных конструкций со сварными соединениями.
10. Изобразите типичные формы сварных зубчатых колес.
11. В чем преимущества деталей из аустенитных сталей в отношении стабильности?
12. Как учитывается динамический эффект в нагружении деталей машин?
13. Каким образом назначаются допустимые напряжения в деталях машин?
14. Как рассчитываются прикрепления спиц к ободу и втулкам в конструкциях с зубчатыми зацеплениями?
15. Приведите примеры одно- и двухступенчатых маховиков.
16. Приведите пример сварного барабана.

17. Каким образом проверяется несущая способность сварных барабанов?
18. Какие особенности в конструкции барабанов больших диаметров под тяжелые нагрузки?
19. Каким образом производится расчет прочности сварных соединений в зубчатом колесе?
20. Как рассчитывать на прочность сварной шов в корпусе редуктора?
21. В каких случаях более рентабельны сварные корпуса по сравнению с литыми или штампованными?
22. В каких деталях машин целесообразно применение соединений, сваренных электрошлаковым способом?
23. Какие детали в автомобиле изготовляются сварными?
24. Какие коэффициенты запаса прочности принимают в узлах турбин?
25. Опишите схему расчета реактора с одним диском, подверженного нагружениям от центробежных сил?
26. В какой форме применяются сварные конструкции в гидромашиностроении?
27. Как производится расчет на усталостную прочность в деталях машин с использованием эффективных коэффициентов концентрации?
28. Что такое надежность машин?
29. Какую роль играют в надежности материалы?
30. Какую роль при проектировании деталей машин играет ЭВМ?
31. Чем определяется возможный оптимум объекта?

ПРИЛОЖЕНИЕ

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА И ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭВМ

При изучении курса «Расчет и проектирование сварных конструкций» предусматривается проведение ряда лабораторных работ, конкретное содержание которых может быть несколько различным в разных вузах. По своему назначению работы могут быть разделены на три направления:

А. Концентрация напряжений в сварных соединениях.

Б. Работа элементов сварных конструкций.

В. Сварочные деформации и напряжения.

Ниже дан примерный перечень работ по этим направлениям.

А. 1. Распределение усилий и напряжений в сварных соединениях.

2. Концентрация напряжений в сварных соединениях.

Б. 3. Рабочие напряжения в сварных балках.

4. Распределение сил в элементах сварных ферм.

5. Рабочие напряжения в сварных сосудах под давлением.

6. Устойчивость стоек со сплошными и составными поперечными сечениями.

В. 7. Собственные (внутренние) временные и остаточные напряжения.

8. Определение усадочной силы и прогиба при наплавке валика на кромку полосы или при сварке продольными швами балки таврового сечения.

9. Определение поперечной усадки и угловой деформации при наплавке валика на пластину или при сварке соединения втавр.

10. Изгиб балок от продольных и поперечных швов.

11. Деформации сварной пластины с течением времени.

В работе 1 можно использовать модель нахлесточного соединения с 5-ю рядами сварных точек (рис. П.1, *а*). Модель изготовлена из листового металла толщиной 4. . .6 мм, имеет профрезерованные пазы, имитирующие зазор между

пластинами. С двух сторон для исключения влияния изгиба на среднем стержне наклеены датчики сопротивления. Разность показаний датчиков *1* и *2* позволяет определить силу, передаваемую первой точкой, *2* и *3* — силу, передаваемую второй точкой, и т. д. По результатам измерения получают пять значений сил, распределение которых вдоль

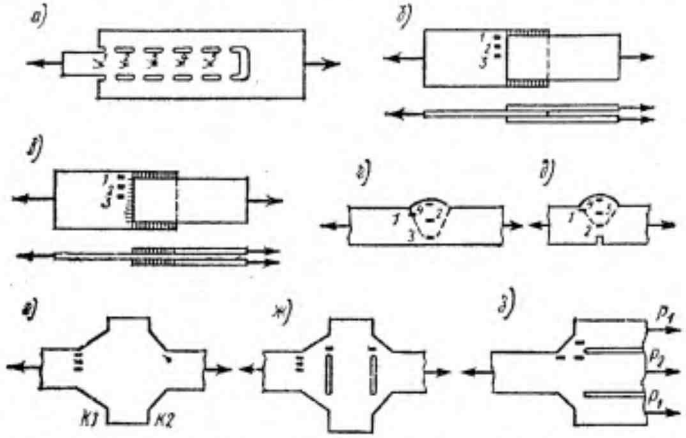


Рис. П.1. Модели сварных соединений для определения концентрации напряжений

образца напоминает цепную линию. Распределение напряжений можно изучать и в нахлесточных соединениях с угловыми швами на двух образцах (рис. П.1, *б*, *в*), в одном из которых имеются только фланговые швы, а в других — фланговые и лобовые. Цифрами *1*, *2*, *3* показаны датчики, наклеенные с двух сторон. Наличие лобового шва дает существенное выравнивание эпюры напряжении по сравнению со случаем, когда лобового шва нет.

В работе 2 концентрация напряжений может изучаться на самых различных видах сварных соединений (рис. П.1, *г*... *з*). Все они изготовлены из пластин и имеют наклеенные с двух сторон датчики, показанные короткими линиями. В образцах на рис. П.1, *г*, *д* хорошо обнаруживается концентрация напряжений в стыковом соединении с непроваром, а также в зоне *1* перехода к усилению шва. На моделях рис. П.1, *е*, *ж* можно сделать разные катеты *K1* и *K2*, что сказывается на концентрации напряжений в зоне перехода ко шву.

Значительная концентрация напряжений возникает вблизи непровара (рис. П.1, *ж*), а также в нахлесточном

соединении (рис. П.1, *з*). В последнем случае она зависит от нагруженности шва: при наличии сил P_1 шов является рабочим, при наличии только силы P_2 — связующим. Измерение напряжений в моделях (рис. П.1, *г*. . .*з*) может проводиться с использованием метода фотоупругости или электромагнитного метода.

В работах 3 и 4 измерения напряжений предназначены для иллюстрации закономерностей, вытекающих из

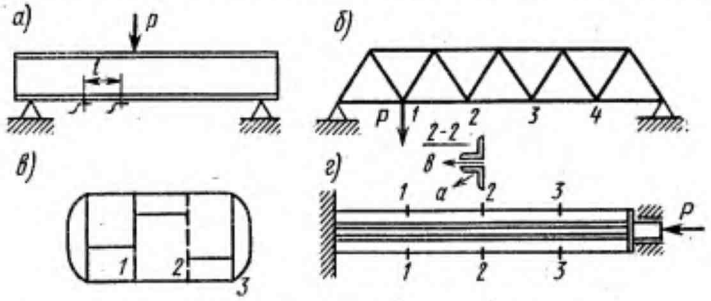


Рис. П.2. Модели сварных конструкций

положений строительной механики. Изменение напряжений $\Delta\sigma$ на длине l в поясе двутавровой сварной балки (рис. П.2, *а*), нагруженной сосредоточенной силой, позволяет определить касательные силы в поясных швах по формуле $\Delta\sigma \cdot A_п/(2\beta Kl)$, где $A_п$ — площадь поперечного пояса. Нагружение фермы в сварных узлах *1*, *2*, *3*, *4* силой *P* (рис. П.1, *б*) и измерение напряжений в стержнях позволяет построить линии влияния и сопоставить их с расчетными линиями влияния. Несмотря на то что сварные узлы фермы не являются шарнирами, соответствие между расчетными и экспериментальными в средней части стержней данными получается хорошее. Одновременно можно зарегистрировать заметную неравномерность напряжений по сечению стержня вблизи присоединения его к косынке.

Работа 5 позволяет в сварном цилиндрическом сосуде со стыковыми *1* и нахлесточными *2* соединениями (рис. П.2, *в*) определить при подаче в него гидравлического давления соотношение 1 : 2 для продольного и окружного напряжений, значительное отклонение от расчетных напряжений вблизи нахлесточного соединения *2*, наличие существенных напряжений изгиба в зоне *3* перехода к днищу и сжимающих напряжений в окружном направлении, что в тонкостенных сосудах может вызвать потерю устойчивости.

В работе 6 исследуется центрально-нагруженная стойка,

состоящая из двух алюминиевых уголков (рис. П.2, *г*). При отсутствии скреплений уголки теряют устойчивость при одном значении силы *P*. После установки струбцин, скрепляющих уголки в сечениях *1*, *2* и *3*, значение критической силы заметно возрастает и изменяется направление отклонения стержней с линии *а* на линию *в*. Данный опыт указывает на необходимость скрепления стержней сварными накладками или прокладками. Последняя лабораторная работа может быть дополнена расчетом на ЭВМ устойчивости, составленной из двух швеллеров стойки. В диалоговом режиме проводится многократный подбор швеллеров и расстояния между ними для того, чтобы удовлетворить сразу нескольким требованиям. Расчет при этом проводит ЭВМ по заложенной в ней программе и указывает студенту уровень имеющегося несоответствия между фактическим и допускаемым напряжениями. Такая «игра» позволяет выработать представление о реальной значимости отдельных факторов и рациональности расположения швеллеров при разном виде нагрузок. Программа 1, прилагаемая ниже, позволяет организовать такой расчет, например на ЭВМ СМ-4 и ей подобных.

Работы 7. . .11 могут быть организованы следующим образом.

В работе 7 можно использовать прямоугольную пластину толщиной 4. . .6 мм с прорезями (рис. П.3, *а*), которые предназначены для предотвращения нагрева участков *B* во время ввода теплоты или наплавки валика на участке *A*. Целесообразно сечение участка *A* и суммарное сечение двух участков *B* иметь одинаковыми. Деформации на участке *B* можно измерять механическими деформометрами или датчиками. В одном из опытов нагревателем *C* вызывают расширение участка *A* и появление растягивающих напряжений в участках *B*. После полного остывания остаточных напряжений нет. В другом опыте на участок *A* наплавляют валик (в продольном или поперечном направлении), что вызывает в зонах *B* остаточные напряжения сжатия. Пластины могут использоваться многократно.

В работе 8 (рис. П.3, *б*) измеряют деформометром длину базы *CD* (около 100 мм) на полосе *1* и индикаторной головкой ее начальный прогиб.

Затем наплавляют по линии *AB* валик и после полного остывания измерения повторяют. По укорочению и прогибу определяют усадочную силу и эксцентриситет ее приложения. При сварке балки таврового профиля из двух полос можно ограничиться измерением только прогиба.

Работа 9 может выполняться на пластине (рис. П.3, *в*). Измерения баз проводятся с двух сторон съемным деформометром, затем наплавляют валик или приваривают полоску небольшой ширины. Полусумма измеренных деформаций позволяет получить среднюю усадку, а полуразность — угловой изгиб β.

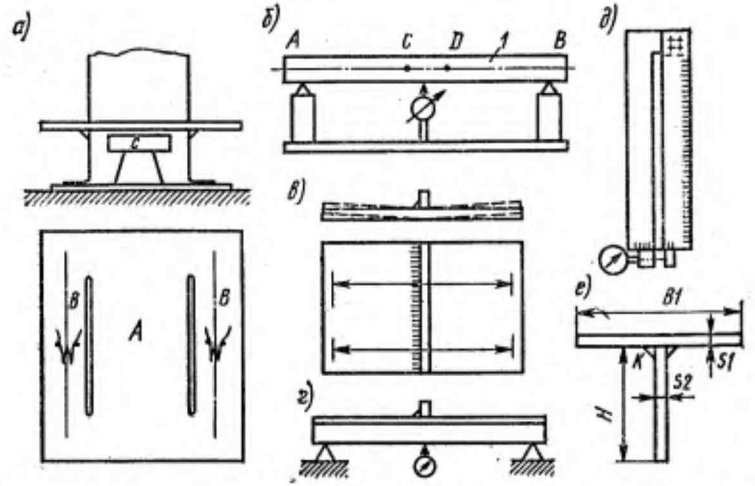


Рис. П.3. Образцы, используемые для определения сварочных напряжений и деформаций

Работа 10 в первой своей части дублирует вторую часть работы 8, выбор варианта зависит от конкретных условий. Вторая часть работы 10 предусматривает определение прогиба балки от поперечной усадки поперечного шва (рис. П.3, *г*) и использование формулы (6.44).

В работе 11 (рис. П.3, *д*) используется пластина из закаливающейся стали, на кромку которой наплавляется валик. После полного остывания распад остаточного аустенита вызывает деформирование полосы, что регистрируется индикаторной головкой во времени.

Так как в лабораторных работах не может быть получен из-за ограниченного времени большой массив экспериментальных данных, целесообразно дополнять их расчетами на ЭВМ и строить зависимости деформаций от каких-либо параметров для более наглядного представления имеющихся закономерностей. Например, программа 2, реализованная на ЭВМ СМ-4, предназначена для вычисления прогиба тав-

ровой балки, сечение которой дано на рис. П.3, *е*. Варьируемые величины приведены в таблице.

Таблица

Значение	K, см	S1, см	B1, см	S2, см	H, см	L, см	T, Н/см²
Минимальное							
Максимальное							

Для величин, которые сохраняются неизменными, минимальное и максимальное значения указываются одинаковыми. Программа допускает возможность две величины сделать варьируемыми. Число точек на интервале варьирования указывается значениями № 1 и 2. Их произведение не должно превышать 40. Аналогичным образом может быть построен расчет для определения прогибов балки от поперечных швов, в том числе при значительном числе поперечных ребер.

Наука о создании сварных конструкций охватывает принципиальные вопросы рационального проектирования генеральных систем и схем машин, аппаратов, конструкций строительных, которые в основном разрабатываются специалистами отраслей.

Крайне большое значение имеет при проектировании конструкций использование накопленного опыта, применение типизированных конструкций, обеспечивающих прогрессивную технику.

Создание сварных конструкций требует рационального выбора металла, обеспечивающего металлоемкость проектируемых объектов, и технологичности сварочных процессов.

На очередь дня встают вопросы использования материалов с самыми разнообразными свойствами: сталей, высокопрочных, коррозионно-устойчивых, теплоустойчивых, хладнопрочных и т. д.; цветных сплавов; керамики; композитов; полимеров.

При проектировании сварных соединений необходимо учитывать технологическую прочность соединяемых материалов — сопротивляемость образованию трещин при сварке, эксплуатационную прочность, в особенности чувствительность к концентраторам напряжений при переменных нагружениях, вязкость, сопротивление удару.

Острой задачей является использование покрытий с целью сохранения конструкций от отрицательного влияния внешней среды и ослабления отрицательного влияния локальных поверхностей концентраторов.

При проектировании сварных конструкций необходимо правильно назначать технологические процессы сварки, выходить за пределы традиционных дуговой и контактной сварки, использовать методы соединения электронным лучом, лазером, диффузией, ультразвуком и т. д., широко применять голографические методы исследования, а также натурные испытания элементов проектируемых конструкций.

Несмотря на большое количество работ, посвященных изучению напряженного состояния сварной конструкции как в отношении напряжений, вызванных внешними си-

лами, так и к самим сварочным процессам, многие вопросы этой категории остаются еще не вполне решенными.

Разрабатываются и будут продолжать разрабатываться вопросы устранения отрицательного влияния сварочных напряжений в отношении охрупчивания объектов, перемещений, испытываемых объектами, деформированием в течение времени, вредным влиянием напряжений на прочность, особенно при переменных нагрузках.

В создании новой прогрессивной техники необходимо предусматривать широкое применение электронно-вычислительных машин для целей более глубокого изучения напряженно-деформированного состояния, предразрушений, расширенного применения физических методов контроля, а также автоматизированного проектирования конструкций.

Специалист в отрасли проектирования сварных конструкций должен опираться на специалиста-сварщика для решения вопросов о рациональном применении металлургических, технологических процессов и расчетов прочности сварных конструкций. Инженеры-сварщики должны изучать условия работы проектируемых конструкций с разных сторон.

В гармонии и комплексном решении общенаучных, общетехнических и отраслевых вопросов будет развиваться прогрессивное создание сварных объектов.

Во втором томе учебника будут рассмотрены вопросы контроля качества сварных соединений и материалов, а также комплекс технологических мероприятий, обеспечивающих экономичное производство сварных конструкций на базе автоматизированных и механизированных линий и роботизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Винокуров В. А., Григорьянц А. Г.* Теория сварочных деформаций и напряжений. М., 1984.
2. *Макаров Э. Л.* Холодные трещины при сварке легированных сталей. М., 1981.
3. *Николаев Г. А., Куркин С. А., Винокуров В. А.* Сварные конструкции. М., 1982. Ч. 1.: 1983, Ч. 2.
4. *Николаев Г. А., Куркин С. А., Винокуров В. А.* Расчет, проектирование и изготовление сварных конструкций. М., 1971.
5. *Прохоров Н. Н.* Технологическая прочность сварных швов в процессе кристаллизации. М., 1979.
6. Сварка в машиностроении. Справочник в 4-х томах. М., 1979. Т. 3.
7. СНиП II-23—81. М., 1982.
8. *Туфяков В. И.* Усталость сварных соединений. Киев, 1973.
9. *Куркин С. А., Ховов В. М., Рывачук А. М.* Технология, автоматизация и механизация производства сварных конструкций, М., 1989

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3
Условные обозначения 5

Глава 1. Развитие сварки в конструкциях 7

§ 1.1. Исторические этапы применения сварки в конструкциях 7
§ 1.2. Масштабы применения сварных конструкций в СССР 8
§ 1.3. Ближайшие задачи 11
Контрольные вопросы к главе 1 13

Глава 2. Материалы сварных конструкций 13

§ 2.1. Стали 13
§ 2.2. Марки сталей, механические свойства материалов 14
§ 2.3. Эффективность применения качественных сталей 19
§ 2.4. Повышение свойств сталей поверхностной обработкой 23
§ 2.5. Цветные сплавы 24
§ 2.6. Коррозионная стойкость сталей и цветных сплавов 27
§ 2.7. Сверхпластичные сплавы 28
§ 2.8. Пластмассы 30
§ 2.9. Композитные материалы 32
§ 2.10. Сортамент 34
§ 2.11. Централизованное изготовление элементов сварных конструкций 38
Контрольные вопросы к главе 2 39

Глава 3. Сварные соединения и расчет их статической прочности 40

§ 3.1. Классификация видов сварки 40
§ 3.2. Принцип расчета сварных соединений по предельным состояниям и допускаемым напряжениям 41
§ 3.3. Сварные соединения, выполненные дуговой сваркой 48
§ 3.4. Сварные соединения, выполненные контактной сваркой 63
§ 3.5. Соединения при специальных методах сварки 70
Примеры расчета 77
§ 3.6. Соединения при сварке пластмасс 79
§ 3.7. Болтовые соединения 81
§ 3.8. Клеесварные соединения 82
§ 3.9. Паяные соединения 85
§ 3.10. Обозначение сварных соединений на чертежах 88
§ 3.11. Механическая неоднородность сварных соединений, мягкая прослойка, композитные швы . . 92
Контрольные вопросы к главе 3 104

Глава 4. Концентрация напряжений 106

§ 4.1. Общие сведения. Усложнение схемы напряженного состояния вблизи концентраторов 106
§ 4.2. Концентрация напряжений в соединениях, полученных сваркой плавлением 108
§ 4.3. Распределение напряжений в стыковых швах . . 109
§ 4.4. Распределение напряжений в лобовых швах . . 110
§ 4.5. Распределение напряжений в соединениях с фланговыми швами 112
§ 4.6. Распределение напряжений в комбинированных соединениях с лобовыми и фланговыми швами 115
§ 4.7. Распределение усилий в нахлесточных соединениях, выполненных шовной сваркой 117
§ 4.8. Распределение усилий в точечных соединениях, выполненных контактным способом 117
§ 4.9. Концентрация напряжений в паяных швах . . 119
§ 4.10. Влияние низких температур на свойства сварных соединений 122
§ 4.11. Влияние высоких температур на свойства сварных соединений 125
Контрольные вопросы к главе 4 127

Глава 5. Сопротивление сварных соединений усталости . . 129

§ 5.1. Прочность основного металла при переменных (циклических) нагрузках 129
§ 5.2. Диаграмма усталостной прочности 129
§ 5.3. Влияние характеристики цикла r на прочность при переменных нагрузках 131
§ 5.4. Коэффициенты концентрации и их влияние на усталостную прочность 134
§ 5.5. Влияние частоты циклов нагружения на усталостную прочность 135
§ 5.6. Сопротивление усталости сварных соединений, выполненных дуговой сваркой 136
§ 5.7. Влияние на усталостную прочность технологических дефектов 138
§ 5.8. Усталостная прочность разных видов сварных соединений 139
§ 5.9. Влияние на усталостную прочность термообработки сварных соединений 142
§ 5.10. Влияние на усталостную прочность обертонов 143
§ 5.11. Сопротивление усталости сварных соединений выполненных контактной сваркой 145
§ 5.12. Принципы проектирования конструкций, предназначенных для работы при переменных нагрузках. Послесварочная обработка соединения для повышения сопротивления усталости 147
§ 5.13. Пути повышения усталостной прочности . . . 150
§ 5.14. Расчетная оценка пределов выносливости сварных соединений 151
Примеры расчета 158
Контрольные вопросы к главе 5 159

Глава 6. Сварочные напряжения, деформации и перемещения 161

§ 6.1. Образование и определение напряжений и деформаций при сварке 161

§ 6.2. Распределение остаточных напряжений в сварных соединениях 178
§ 6.3. Деформации и перемещения в зоне сварных соединений 184
§ 6.4. Различные виды деформаций элементов сварных конструкций 194
§ 6.5. Влияние сварочных напряжений и деформаций на работоспособность конструкций и технологию их производства 209
§ 6.6. Методы уменьшения сварочных напряжений, деформаций и перемещений в конструкциях . . . 219
Контрольные вопросы к главе 6 230

Глава 7. Технологическая прочность сварных соединений 231

§ 7.1. Горячие трещины 231
§ 7.2. Холодные трещины 236
§ 7.3. Повышение сопротивляемости образованию горячих и холодных трещин 242
Контрольные вопросы к главе 7 243

Глава 8. Сведения из строительной механики 244

§ 8.1. Понятие о фермах 244
§ 8.2. Геометрическая неизменяемость и статическая определимость ферм 245
§ 8.3. Классификация ферм 246
§ 8.4. Соединения ферм в геометрически пространственную неизменяемую систему 247
§ 8.5. Определение усилий стержней фермы аналитическим методом 247
§ 8.6. Деформации ферм 251
Примеры расчета 253
§ 8.7. Определение расчетных усилий в балках методом линий влияния 255
§ 8.8. Использование линий влияния для определения усилий от системы сосредоточенных сил P и равномерно распределенной нагрузки q 259
§ 8.9. Линии влияния усилий стержневых ферм . . . 260
§ 8.10. Определение усилий стержней ферм при нахождении груза на поясе 266
Контрольные вопросы к главе 8 267

Глава 9. Сварные балки 269

§ 9.1. Эволюция конструктивных форм балок 269
§ 9.2. Централизованное изготовление сварных балок 271
§ 9.3. Расчет жесткости и прочности балок (подбор сечений) 273
§ 9.4. Общая устойчивость 278
§ 9.5. Местная устойчивость 280
§ 9.6. Расчет балок с учетом пластических деформаций 282
§ 9.7. Работа балок на кручение 284
§ 9.8. Сварные соединения 286
§ 9.9. Стыки 288
§ 9.10. Применение штампованных и гнутых профилей 288
§ 9.11. Балки из алюминиевых сплавов 290
§ 9.12. Опорные части 291

§ 9.13. Результаты испытаний балок на усталостную прочность и пути ее повышения 292
§ 9.14. Примеры конструкции балок 294
§ 9.15. Пример расчета и конструирования балки . . . 296
Контрольные вопросы к главе 9 303

Глава 10. Стойки 305

§ 10.1. Типы поперечных сечений 305
§ 10.2. Прочность и устойчивость стоек со сплошными поперечными сечениями при центральном приложении усилий 306
§ 10.3. Прочность и устойчивость стоек при эксцентрично приложенной силе 310
§ 10.4. Расчет устойчивости стойки, имеющей поперечное сечение со свободной осью 314
§ 10.5. Соединительные элементы 315
§ 10.6. Стыки 319
§ 10.7. Базы и оголовки 320
§ 10.8. Примеры конструкций стоек 320
Контрольные вопросы к главе 10 321

Глава 11. Сопряжения элементов, работающих на изгиб . . 323

§ 11.1. Типы сопряжений 323
§ 11.2. Простейшие соединения 325
§ 11.3. Расчет прочности по способу расчленения на составляющие 327
§ 11.4. Расчет прочности по способу полярного момента инерции 328
§ 11.5. Расчет прочности по способу осевого момента инерции 330
§ 11.6. Сопряжения балок различных профилей . . . 331
§ 11.7. Сопряжения балок между собой с дополнительными усилениями 336
§ 11.8. Сопряжения балок со стойками 338
§ 11.9. Точечные соединения, работающие на изгиб . . 339
Контрольные вопросы к главе 11 341

Глава 12. Решетчатые конструкции (фермы) 342

§ 12.1. Типы ферм. Выбор геометрической схемы . . . 342
§ 12.2. Определение нагрузок и усилий стержней . . . 343
§ 12.3. Поперечные сечения стержней 344
§ 12.4. Узлы ферм 349
§ 12.5. Специальные конструкции ферм 354
§ 12.6. Стыковые соединения поясов 358
§ 12.7. Разновидности покрытий 359
§ 12.8. Применение алюминиевых сплавов в сварных конструкциях ферм 360
§ 12.9. Применение пайки 363
§ 12.10. Пример расчета фермы 364
§ 12.11. Применение предварительно напряженных элементов 366
Контрольные вопросы к главе 12 369

Глава 13. Оболочковые конструкции 371

§ 13.1. Вертикальные цилиндрические резервуары с плоскими днищами. Расчет оболочек по методу Лапласа 371

§ 13.2. Цистерны 378
§ 13.3. Газгольдеры и сферические резервуары 380
§ 13.4. Применение специальных сплавов для изготовления резервуаров и цистерн 382
§ 13.5. Тонкостенные сосуды 384
§ 13.6. Трубы и трубопроводы 388
§ 13.7. Достижения СССР в строительстве оболочковых конструкций 393
§ 13.8. Барабаны котлов 394
§ 13.9. Коррозия оболочковых конструкций 396
Контрольные вопросы к главе 13 399
Глава 14. Сварные детали машин 400
§ 14.1. Эффективность использования сварки в деталях машин 400
§ 14.2. Общие соображения при проектировании деталей машин 402
§ 14.3. Барабаны 407
§ 14.4. Корпуса редукторов 412
§ 14.5. Шестерни и шкивы 415
§ 14.6. Сварные рамы 419
§ 14.7. Сварные детали автомобилей 424
§ 14.8. Сварные детали турбин 426
§ 14.9. Надежность деталей машин 429
Контрольные вопросы к главе 14 431
Приложение. Краткое содержание лабораторного практикума и примеры использования ЭВМ 433
Заключение 439
Список литературы 441

Учебное издание

Николаев Георгий Александрович
Винокуров Виталий Александрович

СВАРНЫЕ КОНСТРУКЦИИ.
РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Заведующий редакцией *А. В. Дубровский.* Редактор *Н. М. Щепина.* Младший редактор *Т. Ф. Артюхина.* Художественный редактор *С. Г. Абелин.* Художник *В. М. Боровков.* Технический редактор *Е. И. Герасимова.* Корректор *Г. Н. Буханова*

ИБ № 8580

Изд. № ОТ-720. Сдано в набор 16.11.89. Подп. в печать 28.03.90. Формат 84×108¹/₃₂. Вум. тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Объем 23,52 усл. печ. л. 23,52 усл. кр.-отт. 23,41 уч.-изд. л. Тираж 27 000 экз. Зак. № 607. Цена 1 р. 10 к.

Издательство «Высшая школа», 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., 29/14.

Отпечатано с матриц ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени МПО «Первая Образцовая типография» Госкомпечати СССР, 113054, Москва, Валовая, 28 во Владимирской типографии Госкомпечати СССР, 600000, г. Владимир, Октябрьский проспект, д. 7.

Николаев Г. А., Винокуров В. А.

Н 63 Сварные конструкции. Расчет и проектирование: Учеб. для вузов/Под ред. Г. А. Николаева.— М.: Высш. шк., 1990.— 446 с.: ил.

ISBN 5-06-001555-6

Учебник составлен в соответствии с программой курса сварных конструкций. В него включены вопросы, необходимые для подготовки студентов по указанному направлению: методы проектирования сварных соединений, элементы сварных конструкций, анализ их прочности. Также внесены данные, облегчающие студенту восприятие преподносимого материала – контрольные вопросы для самопроверки, предложения по выполнению самостоятельных заданий.

Н $\frac{2704060000\,(4309000000)-295}{001\,(01)-90}$ 209—90

ББК 30.4
6Г4.05