

3. Расчет сварных соединений, работающих при статических нагрузках

3.1. Основы проектирования сварных соединений

Объем металла, находящегося в зоне сварного соединения составляет доли процента от объема металла всей конструкции, однако именно прочностью этих зон во многих случаях определяется прочность конструкции, поскольку термическое и механическое воздействие сварки на металл может существенно изменять его прочностные и пластические свойства. По этой причине расчету сварных соединений, обоснованию их конфигурации и места размещения на конструкции необходимо уделять особое внимание при проектировании.

На стадии проектирования сварной конструкции должны быть решены следующие задачи:

1. Обеспечение прочности. Конструкция должна выдерживать заданную нагрузку без разрушения и появления недопустимых деформаций.

2. Обеспечение надежности. Должна быть обеспечена безотказная работа конструкция в течение требуемого периода эксплуатации с заданной вероятностью.

3. Обеспечение технологичности. Должна быть обеспечена возможность и экономичность изготовления конструкции, при условии сохранения требуемых показателей качества, прочности, надежности.

4. Выполнение специальных требований, например, к внешнему виду конструкции; точности; коррозионной стойкости; теплостойкости; хладостойкости; магнитным свойствам и др.

Некоторые из этих задач могут быть решены на различных этапах: при проектировании, разработке технологии, изготовлении, эксплуатации, но на этапе проектирования затраты их решения наиболее низкие. По мере продвижения по цепочке жизненного цикла сварной конструкции цена ошибки решений, принятых при проектировании возрастает по экспоненте.

Специалист сварочного производства, как правило, не принимает непосредственное участие в расчете и проектировании сварных конструкций. Обычно ему отводят роль эксперта-консультанта при анализе принятых решений. Вместе с тем, на ряд вопросов, связанных со спецификой образования сварного соединения, влиянием термического и механического воздействия сварки на свариваемый материал, с технологическими возможностями различных процессов сварки может ответить только специалист в области сварочного производства. Поэтому совместная работа над проектом конструктора и технолога, обладающего базовыми знаниями в области проектирования сварных конструкций, не только целесообразна, но и во многих случаях является обязательной.

Процесс проектирования проходит несколько этапов:

- определяют основные размеры элементов конструкции и их компоновку;
- определяют место расположения сварных швов и нагрузку, действующую на них;
- определяют тип сварного соединения и выбирают способ сварки;
- производят расчет размеров сварных швов, исходя из необходимости обеспечения прочности соединения при статических нагрузках;
- проводят анализ локального напряженного состояния в районе сварных соединений с целью определения необходимости произвести корректировку расчета прочности соединения при статических нагрузках;
- производят при необходимости расчет прочности сварных соединений при действии переменных нагрузок (проверка усталостной прочности), оценивают сопротивление хрупкому разру-

шению и сопротивление развитию разрушения, проводят расчет прочности с позиции возможного воздействия коррозионной среды;

- оценивают влияние сварочных напряжений и деформаций конструкций, возникающих в результате сварки;
- устанавливают требования к точности конструкции и качеству сварных соединений;
- проводят анализ технологических аспектов с целью обеспечения технологичности конструкции.

Возможны две стратегии проектирования сварных конструкций (рис. 3.1).

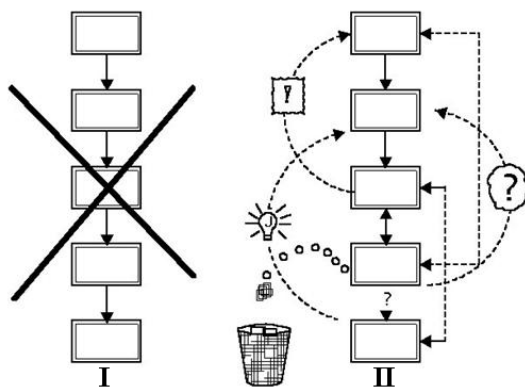


Рис. 3.1. Стратегии проектирования сварных конструкций.

Стратегия I предполагает последовательное решение задач отдельных этапов проектирования без корректировки пути решения. Такую стратегию применяют редко, в основном, при решении типовых задач проектирования.

Стратегия II предполагает на отдельных этапах проектирования проводить анализ достигнутых результатов и при необходимости вносить коррективы в дальнейший ход проектирования, возвратиться на предыдущие этапы, изменить принятые решения или исходные данные. При проектировании сварных конструкций такая стратегия позволяет учесть многообразия взаимно влияющих факторов и оптимизировать результат проектирования.

3.2. Обоснование необходимого запаса при расчете на прочность

Основная цель расчета прочности состоит в том, чтобы обеспечить работоспособность конструкции при заданных нагрузках и условиях эксплуатации. В общем случае некоторый параметр Q , характеризующий нагрузку, должен быть меньше параметра R , характеризующего сопротивление разрушению.

$$Q < R \dots\dots\dots 3.1$$

В практике расчета прочности при статическом нагружении в качестве параметра Q принимают величину номинальных напряжений (нормальных $\sigma_{\text{ном}}$ или касательных $\tau_{\text{ном}}$), расчет которых производится без учета неравномерности распределения напряжений по сечению, обусловленной концентрацией напряжений.

В качестве R принимают величину, характеризующую прочность металла в зоне предполагаемого разрушения.

При этом приходится учитывать возможность случайного рассеяния параметров, характеризующих нагрузку, и прочностных характеристик сварного соединения. В связи с чем, расчет должен предусматривать некоторый запас прочности. Рис. 3.2. иллюстрирует влияние рассеяния параметров, принимаемых при расчете на величину запаса прочности.

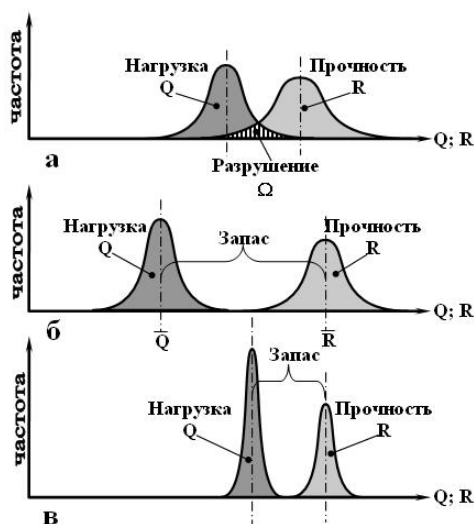


Рис. 3.2. Схема влияния рассеяния параметров нагрузки и прочности на запас прочности

Величина нагрузки Q , действующей на сварное соединение, может иметь отклонение от принятой в расчете из-за недостаточной изученности условий

эксплуатации, неполного учета действующих силовых факторов, появления дополнительных нагрузок при изготовлении и монтаже конструкции и др.

Аналогичные отклонения от принятых в расчете значений могут иметь прочностные характеристики (R). Обычно эти отклонения носят случайный характер и их можно условно выразить в виде кривых Гаусса плотности распределения (относительной частоты) случайных величин Q и R.

Если в расчет приняты средние значения параметров, то расстояние между средними линиями выражает запас прочности, а площадь фигуры Ω , образованной в зоне пересечения кривых (рис. 3.2 а), характеризует вероятность разрушения сварного соединения. Изменяя величину запаса прочности можно влиять на площадь фигуры Ω и надежность конструкции (рис. 3.2 б).

Следует иметь в виду, что величина запаса прочности существенно влияет на экономические показатели результатов проектирований. Чрезмерное уменьшение запаса прочности снижает надежность конструкции и в случае ее разрушения может привести к материальным потерям и дополнительным затратам на ремонт. Чрезмерное увеличение запаса приводит к увеличению массы конструкции, трудоемкости изготовления и, следовательно, к увеличению затрат на производство и эксплуатацию. Поэтому идти по пути увеличения запаса прочности контр продуктивно. Очевидно, что необходимо стремиться к уменьшению дисперсии значений нагрузки и прочности, т.е. к уменьшению ширины области рассеяния значений (рис. 3.2. в). Это может быть достигнуто за счет более глубокого анализа условий эксплуатации конструкции, применения современных методов расчета, применения более качественных материалов, совершенствования технологии сварки и управления сварочным производством.

Запас прочности принято характеризовать относительной величиной называемой коэффициент запаса прочности “n”:

$$n = \frac{R}{\sigma} \dots\dots\dots 3.2;$$

где R – нормативное сопротивление металла зоны предполагаемого разрушения (прочность), σ – напряжения, действующие в этой зоне (нагрузка). Таким образом, коэффициент запаса прочности показывает, во сколько раз показатель прочности превышает показатель нагрузки.

При назначении величины коэффициента запаса прочности учитывают: степень изученности факторов, влияющих на нагруженность сварного соединения, стабильность механических свойств основного металла и металла шва, стабильность технологического процесса, ограничения, накладываемые на массу конструкции, степень опасности последствий разрушения сварной конструкции.

Например, для конструкций, изготавливаемых из материалов с исключительно стабильными механическими характеристиками с применением хорошо отлаженной стабильной технологии сварки, при условии, что нагрузки могут быть определены с высокой степенью уверенности, а малая масса конструкции является определяющим фактором, коэффициент запаса прочности принимают в пределах $n = 1,25 \div 1,5$.

Для конструкций, изготавливаемых из материалов с недостаточно изученными механическими характеристиками на предприятиях, где отсутствует система управления качеством сварочного производства, при условии недостаточной информации об условиях эксплуатации, коэффициент запаса прочности может быть принят в пределах $n = 3 \div 5$.

Требуемую величину коэффициента запаса прочности устанавливают на основании действующих нормативных документов, определяющих правила проектирования сварных конструкций конкретного вида.

В практике нашли применение два метода расчета: расчет по допускаемым напряжениям и расчет по предельному состоянию конструкции.

В соответствии с первым методом номинальные¹ напряжения, действующие в сварном соединении конструкции, не должны превышать некоторого ус-

¹ При расчете по номинальным напряжениям концентрация напряжений не учитывается.

тановленного предельного значения, называемого «допускаемые напряжения». Соответствующий символ заключают в квадратные скобки.

$$\left\{ \begin{matrix} \sigma \\ \tau \end{matrix} \right\} \leq \varphi_w \left\{ \begin{matrix} [\sigma] \\ [\tau] \end{matrix} \right\} \dots\dots\dots 3.3;$$

где φ_w – коэффициент прочности сварного шва, σ и τ – номинальные нормальные или касательные напряжения, действующие в сечении сварного соединения, $[\sigma]$ и $[\tau]$ – допускаемые напряжения.

Расчет по предельному состоянию конструкции предполагает, что действующая нагрузка не должна вызывать наступление предельного состояния. Различают два предельных состояния:

К первому предельному состоянию (предельное состояние I) относят такие состояния конструкции, при которых она перестает удовлетворять заданным эксплуатационным требованиям или требованиям производства работ в результате вязкого, хрупкого, усталостного разрушения или потери устойчивости.

Второму предельному состоянию (предельное состояние II) соответствует появление недопустимых перемещений, прогибов, вибраций и др., нарушающих пригодность конструкции к нормальной эксплуатации. Например, большой упругий прогиб подкрановой балки под действием груза может затруднить перемещение тележки с грузом и означает наступление предельного состояния, даже в том случае, когда уровень напряжений не превышает допускаемых.

Для расчета сварных соединений по предельному состоянию, как правило, рассматривают наступление I-го предельного состояния. Расчет по предельному состоянию II, как правило, используют при расчете конструкции в целом.

Расчет сварных соединений по допускаемым напряжениям наиболее часто применяют в тех случаях, когда конструктивные элементы и условия их эксплуатации не отличаются большим разнообразием, например, при расчете сварных машиностроительных конструкций, сосудов, работающих под давлением,

и др. Величину допускаемых напряжений ($[\sigma]$, $[\tau]$) устанавливают в соответствии с данными, приведенными в нормативных документах в виде таблиц или расчетным путем в зависимости от нормативных характеристик прочности при заданных условиях эксплуатации:

$$[\sigma] = \min \left\{ \frac{R_m}{n_m}; \frac{R_{02}}{n_{02}}; \frac{R_{mt}}{n_{mt}} \right\} \dots \dots \dots (3.4)$$

где R_m , R_{02} , R_{mt} – нормативные характеристики прочности соответственно по временному сопротивлению разрыву, пределу текучести и пределу длительной прочности при заданной температуре эксплуатации;

n_m , n_{02} , n_{mt} – коэффициенты запаса прочности для соответствующей нормативной характеристики прочности. Для сварных стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды² из углеродистых и теплоустойчивых сталей принимают: $n_m=2,4$, $n_{02}=1,5$, $n_{mt}=1,5$. Из полученных по 3.4 значений $[\sigma]$ принимают наименьшее.

Величину коэффициент прочности сварного шва ϕ_w принимают в зависимости от способа сварки, метода контроля качества сварного соединения и относительного объема контролируемых участков шва. Например, для сварных стыковых соединений стационарных котлов, выполненных с полным проваром, нормативный документ РД 10-249-98 предписывает:

- при 100% контроле всех швов с применением радиографического или ультразвукового методов – $\phi_w=1,0$;
- при выборочном контроле объемом не менее 10% – $\phi_w=0,8$;
- при отсутствии контроля или при выборочном контроле объемом менее 10% – $\phi_w=0,7$.

При расчете угловых и тавровых соединений при 100% контроле принимают $\phi_w \leq 0,8$; при выборочном контроле или отсутствии контроля – $\phi_w \leq 0,6$.

² РД 10-249-98. Нормы расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды. СПб.: Изд-во ДЕАН, 2002. – 384с.

Стандарт Американского общества инженеров механиков для сварных соединений котлов и сосудов, работающих под давлением³ предписывает значения коэффициента прочности сварного шва, приведенные в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Значение коэффициента прочности сварного шва ϕ_w
В соответствии с ASME Section VIII

Вид сварного соединения	Значение коэффициента ϕ_w		
	100%	Выборочный	Без контроля
Двусторонние стыковые	1.00	0.85	0.70
Одностороннее, на подкладке	0.90	0.80	0.65
Одностороннее без подкладки	—	—	0.60

Из приведенных выше примеров можно заключить, что выбор значения ϕ_w зависит от степени уверенности в возможности принятой технологии обеспечить прочность сварного соединения на уровне прочности основного металла: чем она выше, тем ближе значение ϕ_w к 1,0.

Значение коэффициента прочности сварного шва существенно зависит от склонности свариваемого материала к разупрочнению под воздействием термического цикла сварки, например, для соединений алюминиевых сплавов, упрочненных пластическим деформированием ϕ_w может быть значительно меньше 1,0.

Преимуществом расчета по допускаемым напряжениям является относительная простота этого метода. К недостаткам следует отнести слабую дифференциацию особенностей условий эксплуатации различных конструкций. Именно по этой причине фактические значения номинальных допускаемых напряжений устанавливают отдельно для различных типов конструкций. В некоторых случаях расчет по допускаемым напряжениям приводит к излишнему расходу металла и избыточному весу конструкции.

³ ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section VIII, Division 1, Rules for Construction of Pressure Vessels, The American Society of Mechanical Engineers, New York, 2001 Edition, 2002 Addenda.

В практике проектирования сварных строительных конструкций, которые отличаются большим разнообразием конструктивных форм и условий эксплуатации, в Советском Союзе был разработан метод расчета по предельному состоянию. Этот метод в настоящее время широко применяется, не только в России, но и в других, промышленно развитых странах мира.

Расчет по предельным состояниям имеет целью обеспечить надежность здания или сооружения в течение всего его срока службы, а также при производстве работ.

Условия обеспечения надежности заключается в том, чтобы расчетные значения нагрузок или ими вызванных усилий, напряжений, деформаций, перемещений, раскрытий трещин не превышали соответствующих им предельных значений, устанавливаемых нормами проектирования конструкций или оснований.

При расчете по I предельному состоянию наибольшее, возможное за время эксплуатации, усилие Q , принятое в расчет, не должно превышать соответствующей уровень наименьшей предельной несущей способности R :

$$Q \leq R \dots\dots\dots 3.5$$

Под величиной Q понимают номинальные напряжения, возникающие в результате воздействия продольной или поперечной силы, изгибающего или крутящего момента или сочетания нагрузок.

В общем виде основное уравнение расчета прочности по первому предельному состоянию в том случае, когда местная пластическая деформация не допускается, имеет следующее выражение (в скобках даны ориентировочные значения коэффициентов, входящих в выражение 3.6 для строительных конструкций):

$$\psi \gamma_f \gamma_n \frac{P}{F} \leq \frac{\gamma_c}{\gamma_m} R_{yn} \dots\dots\dots 3.6$$

где ψ – коэффициент сочетания нагрузок ($\psi \approx 0,6 \div 1,0$); γ_f – коэффициент надежности по нагрузке ($\gamma_f \approx 0,9 \div 1,6$); γ_c – коэффициент условий работы ($\gamma_c \approx$

0,7÷1,2); γ_m – коэффициент надежности по материалу ($\gamma_m \approx 1,025 \div 1,35$); γ_n – коэффициент надежности по ответственности ($\gamma_n \approx 0,8 \div 1,2$). P – величина растягивающей или сжимающей нагрузки; F – площадь поперечного сечения; R_{yn} – предел текучести материала, принимаемый равным значению предела текучести σ_{02} по государственным стандартам или техническим условиям на материал.

Коэффициент надежности по нагрузке учитывает возможное отклонение нагрузок в неблагоприятную (большую или меньшую) сторону от их нормативных значений вследствие изменчивости нагрузок или отступлений от условий нормальной эксплуатации. Коэффициент сочетания нагрузок учитывает уменьшение вероятности одновременного превышения несколькими нагрузками их расчетных значений по сравнению с вероятностью превышения одной нагрузкой ее расчетного значения. Эти коэффициенты рекомендует вводить ГОСТ 27751*⁴ для обеспечения надежности строительных конструкций.

Можно видеть, что левая часть уравнения 3.6 представляет собой величину номинальных напряжений $\sigma_{ном}$ в сечении конструкции, умноженную на коэффициенты ψ , γ_f и γ_n , что в отличие от рассмотренного выше метода расчета по допускаемым напряжениям позволяет более полно учитывать надежность сведений о действующих на конструкцию нагрузках при определении $\sigma_{ном}$.

Правая часть уравнения 3.6, фактически представляет собой величину допускаемых напряжений, получаемую путем деления гарантированного значения предела текучести материала на коэффициент запаса прочности, подсчитываемый как:

$$n_{02} = \frac{\gamma_m}{\gamma_c} \dots\dots\dots 3.7$$

Сопоставляя выражения 3.4 и 3.6 можно видеть, что расчет по предельному состоянию отдельно учитывает запас прочности, необходимый для ком-

⁴ ГОСТ 27751 -88 с изменениями №1 1999г. - Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения по расчету.

пенсации рисков, связанных с возможным отклонением нагрузки от проектной величины (коэффициенты ψ , γ_f и γ_n), и запас прочности, необходимый для компенсации рисков, связанных с возможным отклонением прочностных характеристик материала.

Благодаря этому, метод расчета по предельному состоянию позволяет дифференцированно подойти к расчету конструкций, учесть особенности условий эксплуатации конструкции и стабильность свойств конструкционного материала. Все это позволяет более эффективно использовать конструкционный материал за счет обоснованного назначения запаса прочности.

Подводя итог рассмотрению вопроса о запасе прочности при расчете конструкций необходимо обратить внимание на то, что в настоящее время не существует строгого обоснования выбора величины коэффициента запаса прочности. В основе рекомендаций тех либо иных конкретных значений коэффициентов лежит опыт проектирования и эксплуатации конструкций различного назначения, опыт, накопленный при анализе аварий и повреждений. Этот опыт отражают нормативные документы, действующие в различных отраслях экономики. Поэтому при проектировании и расчете сварных конструкций необходимо использовать нормативные документы той отрасли, для которой предназначена данная конструкция.

Несомненно, важную роль играет опыт, накопленный в мировой практике и, следовательно, при разработке отраслевых нормативных документов необходимо опираться на международные стандарты и рекомендации, такие как, например:

- prEN 1993-1-8: 2003(E) – Проектирование стальных конструкций. Части 1 – 8. Проектирование соединений.
- ISO 16528-1:2007 – Котлы и сосуды, работающие под давлением. Часть 1. Нормы проектирования.
- ASME BPVC Sections - 2007 Boiler and Pressure Vessel Code - Коды по котлам и сосудам высокого давления.

- EN 13455-3 Unfired pressure vessels. Part 3 – Безтопочные сосуды, работающие под давлением.
- AWS D1.1/D1.1M-2006. Structural welding code: Steel – Код Американского сварочного общества. Сварка строительных конструкций. Стали.
- DIN 18800-1 Structural steelwork. Design and construction. – Стальные конструкции. Расчет и проектирование.

3.3. Типы сварных соединений.

Тип сварного соединения определяют взаимным расположением свариваемых элементов и формой подготовки (разделки) их кромок под сварку.

В зависимости расположения соединяемых деталей различают четыре основных типа сварных соединений: стыковые (рис.3.3а), нахлесточные (рис.3.3б), угловые (рис.3.3г) и тавровые (рис.3.3в).

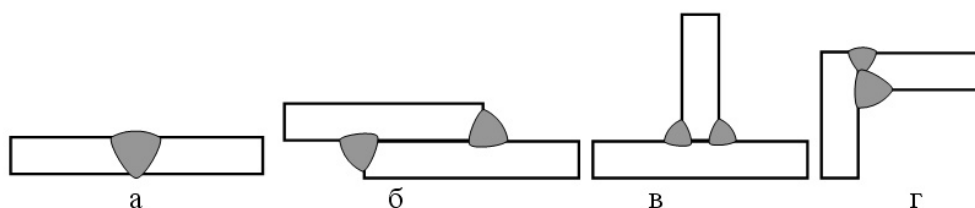


Рис. 3.3. Основные типы сварных соединений.

Соединения могут быть выполнены со сплошным швом по длине или с прерывистым, с полным проплавлением свариваемых кромок или с частичным (соединения с конструктивным непроваром).

Нахлесточные соединения выполняют:

- угловыми швами (рис.3.3б);
- проплавными, когда нахлесточное соединение образуется путем сквозного проплавления одной из деталей (рис.3.4а);
- пробковыми, когда в одной из деталей перед сваркой выполняют сквозное отверстие и производят сварку через отверстие с полным заполнением его (рис.3.4б);

– прорезными, когда в одной из деталей перед сваркой выполняют сквозное отверстие и приваривают ее к другой детали угловым швом через отверстие (рис.3.4в).

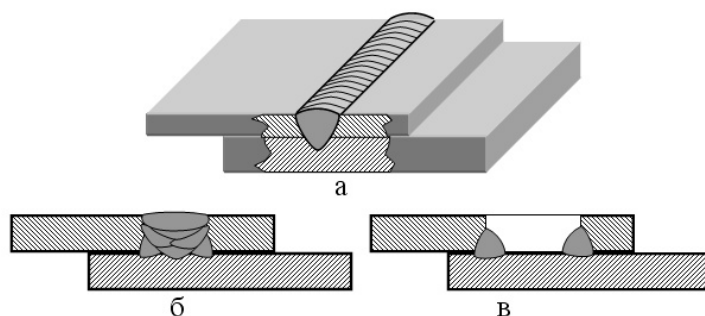


Рис.3.4. Нахлесточные соединения с проплавным швом (а), пробковым (б) и прорезным (в).

Основным нормативным документом, использующим расчет сварных соединений по предельному состоянию при проектировании стальных строительных конструкций, является СНиП⁵ II-23-81* - Стальные конструкции.

В соответствии с этим документом уравнение прочности можно записать по аналогии с ур. 3.3 в следующем виде:

$$\left\{ \begin{matrix} \sigma \\ \tau \end{matrix} \right\} \leq \gamma_c \left\{ \begin{matrix} R_{wy} \\ R_{wu} \\ R_{ws} \\ R_{wf} \\ R_{wz} \end{matrix} \right\} \dots\dots\dots 3.8$$

Где символом R_w обозначается расчетное сопротивление сварного соединения, второй символ после w обозначает следующее: y – расчет по пределу текучести; u – расчет по пределу прочности (временному сопротивлению); s – расчет на срез; f – расчет при разрушении по наплавленному металлу углового шва; z – расчет при разрушении по металлу зоны сплавления углового шва.

Связь значений расчетного сопротивления различных зон сварного соединения с другими прочностными характеристиками металла представлена в таблице 3.2.

⁵ СНиП – Строительные нормы и правила

В приложениях 3.1; 3.2; 3.3 приведены для справки значения расчетных сопротивлений для некоторых строительных сталей и их сварных соединений, выполненных различными способами сварки.

В общем случае расчет сварных соединений на прочность при статических нагрузках сводится к сопоставлению максимальной величины номинальных напряжений в расчетном сечении с величиной расчетного сопротивления для данного сечения (или величиной допускаемых напряжений).

Таблица 3.2

Расчетное сопротивление сварного соединения

Сварные соединения	Напряжение состояние	Условие расчета	Расчетные сопротивления сварных соединений
Стыковые соединения	Сжатие. Растяжение и изгиб при автоматической, полуавтоматической или ручной сварке с физическим контролем качества швов	По пределу текучести	$R_{wy} = R_y = \frac{R_{yn}}{\gamma_m}$
		По временному сопротивлению	$R_{wu} = R_u$
	Растяжение и изгиб при автоматической, полуавтоматической или ручной сварке	По пределу текучести	$R_{wy} = 0,85R_y$
	Сдвиг		$R_{ws} = 0,58R_y$
Соединения с угловыми швами	Срез (условный)	По металлу шва	$R_{wf} = 0,55 \frac{R_{wm}}{\gamma_{wm}}$
		По металлу границы сплавления	$R_{wz} = 0,45R_{un}$

Примечания: 1. Для швов, выполняемых ручной дуговой сваркой, значения R_{wm} рекомендуется принимать равными значениям временного сопротивления разрыву металла шва, указанным в ГОСТ 9467–75*.

2. Для швов, выполняемых автоматической или механизированной сваркой, значение R_{wm} рекомендуется принимать по табл. 4* СНиП II-23-81* (с изм. №1 1999г).

3. Значения коэффициента надежности по материалу шва γ_{wm} рекомендуется принимать равными: 1,25 – при значениях R_{wm} не более 490 МПа; 1,35 – при значениях R_{wm} 590 МПа и более.

4. R_y и R_u – расчетные сопротивления для основного металла, соответственно по пределу текучести и по временному сопротивлению, R_{un} – нормативное значение временного сопротивления основного металла, R_{yn} – нормативное значение предела текучести материала в соответствии со стандартом или ТУ.

5. γ_m – коэффициент надежности по основному металлу.

3.4. Расчет сварных стыковых соединений.

Расчет сварных стыковых соединений на центральное растяжение или сжатие следует производить по формуле:

$$\sigma_{ном} = \frac{N}{tl_w} \leq R_{wy} \gamma_c \text{ или } \frac{N}{tl_w} \leq \varphi_w [\sigma] \dots \dots \dots 3.9$$

где t – наименьшая толщина металла соединяемых элементов, утолщение шва в расчет не принимают;

l_w – расчетная длина шва, равная полной его длине, уменьшенной на $2t$, или полной его длине в случае вывода концов шва за пределы стыка на выводные планки;

N – величина нагрузки, действующей на сварное соединение.

Образование сварного соединения сопровождается появлением структурной и механической неоднородностью. Прочность зоны сплавления или металла шва может отличаться от прочности основного металла, в околошовной зоне может наблюдаться разупрочнение. Поэтому иногда рекомендуется проводить проверочные расчеты прочности в предположении возможности разрушения в различных зонах. Такую проверку рекомендуется проводить для сварных соединений алюминиевых сплавов, упрочненных пластическим деформированием, или в тех случаях, когда нет уверенности, что прочность наплавленного металла шва окажется не ниже прочности основного металла. Вместе с тем, следует иметь в виду, что повысить прочность сварного стыкового соединения за счет применения более прочного присадочного металла не представляется возможным.

В тех случаях, когда через шов сварного стыкового соединения не предполагают передавать большие нагрузки, равнопрочность сварного соединения не требуется. В этих случаях применяют сварку с не полным проплавлением кромок или сварку прерывистыми швами (рис.3.5).

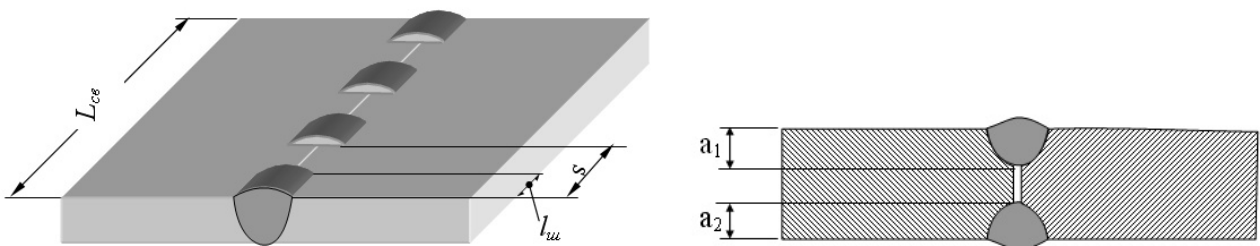


Рис. 3.5. Сварные стыковые соединения с прерывистым швом

и с неполным проплавлением кромок

Прочность таких соединений рассчитывают исходя из действительного размера сечения шва без учета утолщения шва.

Для прерывистых швов:

$$\sigma_{ном} = \frac{N}{tL_{св}} \cdot \frac{s}{l_{ш}} \leq \varphi_w[\sigma] \dots\dots\dots 3.10$$

Для швов с неполным проплавлением:

$$\sigma_{ном} = \frac{N}{(a_1 + a_2)L_{сд}} \leq \varphi_w[\sigma] \dots\dots\dots 3.11$$

Следует иметь в виду, что в сварных соединениях с неполным проплавлением кромок или с прерывистыми швами под действием нагрузки создается высокая концентрация напряжений. Такие соединения не рекомендуется применять для конструкций из недостаточно пластичных материалов или работающих при переменных нагрузках.

По аналогии с рассмотренным выше производят расчет при действии других силовых факторов, например, при действии изгибающего, крутящего момента или перерезывающей силы.

3.5. Расчет сварных соединений с угловыми швами.

Расчетное сечение.

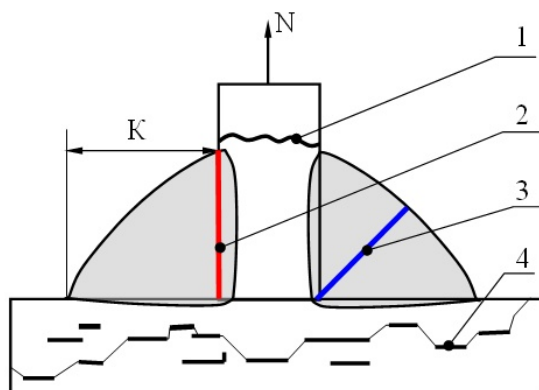
Практика проектирования сварных конструкций свидетельствует о том, что именно соединения с угловыми швами приходится наиболее часто рассчитывать на прочность. Это объясняется несколькими причинами. Во-первых, этот вид соединений является преобладающий во многих отраслях производства. Например, в строительных конструкция объем сварных соединений с угловыми швами достигает 90%.

Во-вторых, большая часть таких соединений передают нагрузку, что требует обоснования их размеров, поскольку завышение размера катета шва приводит к существенному увеличению объема наплавленного металла, трудоем-

кости и энергетических затрат при производстве. Например, завышение катета шва 1мм приводит к увеличению массы наплавленного металла в швах с $K = 10\text{мм}$ приблизительно на 20 %, а в швах с $K = 6\text{мм}$ – более чем на 35 %.

В зависимости от размеров и механических основного металла и металла угловых швов имеется несколько зон, определяющих прочность сварного соединения (рис.3.6).

Если тавровое соединение выполнено с полным проплавлением, а прочность металла шва не уступает прочности основного металла, то наиболее вероятной зоной разрушения является зона 1.



3.6. Возможные зоны разрушения в соединениях с угловыми швами.

При статических нагрузках разрушение сварных соединений с угловыми швами наиболее часто проходит по зоне 3 или зоне 2. Зона 2 служит источником разрушения в том случае, когда прочность металла шва превышает прочность основного металла.

Разрушение по зоне 4 наблюдается в тех случаях, когда прочность основного металла в направлении толщины стенки (прочность в направлении Z) имеет низкую величину или когда в зону сварки попадает дефект расслоение металла. Как правило, эти проблемы возникают при толщине металла более 20мм при высоком содержании в нем вредных примесей, особенно серы.

Расчет прочности шва в зоне 2 и зоне 3.

В обычных случаях расчет сварных соединений выполняют из предположения, что разрушение может произойти либо по зоне 3, либо по зоне 2.

Независимо от направления действующей силы по отношению к шву принято считать, что разрушение угловых швов происходит в результате действия касательных напряжений.

Основным расчетным параметром является размер катета шва K , который определяют как катет вписанного равнобедренного треугольника в контур поперечного шва (рис.3.7). Высота расчетного сечения углового шва зависит от катета шва, зоны предполагаемого разрушения и глубины проплавления.

При ручной дуговой сварке, когда глубина проплавления основного металла невелика (рис.3.8а), высоту расчетного сечения принимают равной катету шва $h = K$, при расчете прочности по зоне 2 и $h = 0,7K$, при расчете по зоне 3. Выпуклость шва при расчете не учитывается.

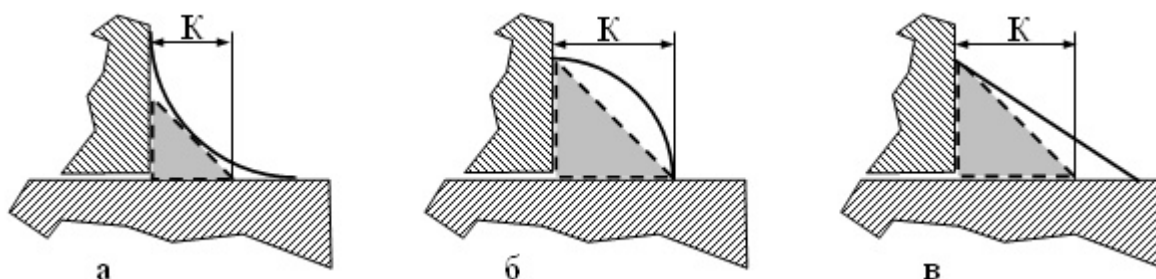


Рис. 3.7. Выделение расчетного значения катета шва.

При сварке с глубоким проплавлением, например, механизированной в защитных газах или автоматической под флюсом, высота расчетного сечения шва увеличивается (рис.3.8б).

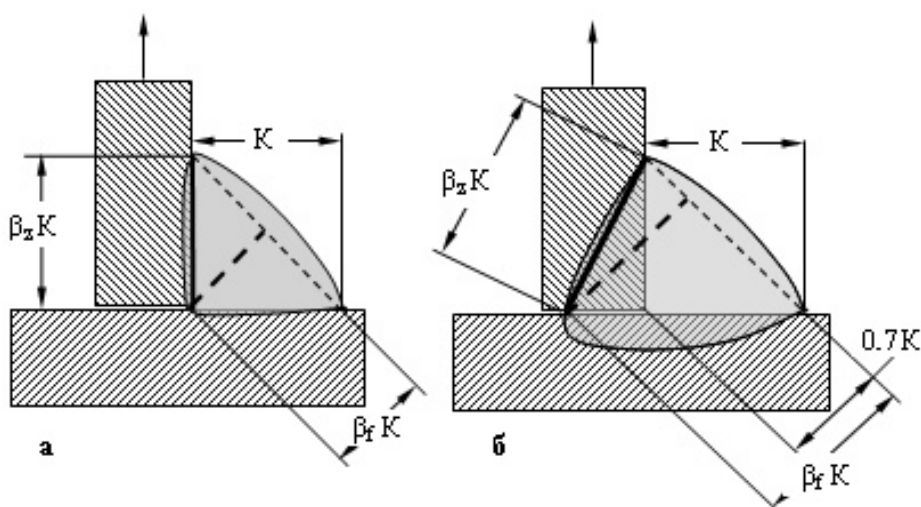


Рис.3.8. Расчетная высота углового шва.

В общем случае высоту расчетного сечения определяют как $h = \beta_z K$ ($\beta_z = 1 \dots 1,15$) для зоны 2 и $h = \beta_f K$ ($\beta_f = 0,7 \dots 1,1$) для зоны 3. Значения коэффициентов β_z и β_f установлены на основании статистической обработки многочисленных экспериментов, проведенных в ИЭС им. Е.О. Патона.

СНиП II-23-81* рекомендует при расчете прочности сварных соединений принимать в зависимости от способа сварки и положения шва значения β_z и β_f в соответствии с таблицей 3.3.

Таблица 3.3

Вид сварки при диаметре сварочной проволоки d , (мм)	Положение шва	Коэффициент	Значения коэффициентов β_f и β_z при катетах швов, (мм)			
			3-8	9-12	14-16	18 и более
Автоматическая при $d = 3 - 5$	В лодочку	β_f	1,1			0,7
		β_z	1,15			1
	Нижнее	β_f	1,1	0,9		0,7
		β_z	1,15	1,05		1
Автоматическая и механизированная при $d = 1,4 - 2$	В лодочку	β_f	0,9		0,8	0,7
		β_z	1,05		1	
	Нижнее, горизонтальное, вертикальное	β_f	0,9	0,8	0,7	
		β_z	1,05	1		
Ручная; механизированная проволокой сплошного сечения при $d < 1,4$ или порошковой проволокой	В лодочку, нижнее, горизонтальное, вертикальное, потолочное	β_f	0,7			
		β_z	1			

Следует отметить, что в тех случаях, когда способ сварки и положение шва в пространстве при выполнении сварки влияет на расчетную высоту углового шва, в технических требованиях на чертежах должна быть сделана соответствующая отметка. Если при проектировании неизвестно, в каком положении будет осуществлена сварка, необходимо принимать значения $\beta_f = 0,7$ и $\beta_z = 1,0$, такие же значения коэффициентов необходимо применять при расчете сварных соединений из сталей с пределом текучести свыше 530 МПа, независимо от вида сварки и положения шва и диаметра сварочной проволоки.

При сварке с использованием технологических приемов, направленных на повышение производительности наплавки, которые сопровождаются снижением глубины проплавления (например, сварка при удлиненном вылете электрода, при прямой полярности постоянного тока, с применением дополнительного присадочного материала и т.п.), значения коэффициентов рекомендуется принимать $\beta_f = 0,7$ и $\beta_z = 1$.

Расчет сварных соединений с угловыми швами проводят, как минимум, по двум сечениям:

– по металлу шва

$$\tau_{ном} = \frac{N}{\beta_f K l_w} \leq R_{wf} \gamma_{wf} \gamma_c \dots\dots\dots 3.12$$

– по металлу границы сплавления

$$\tau_{ном} = \frac{N}{\beta_z K l_w} \leq R_{wz} \gamma_{wz} \gamma_c \dots\dots\dots 3.13$$

где l_w - расчетная длина шва, принимаемая меньше его полной длины на 10 мм;

γ_{wf} и γ_{wz} - коэффициенты условий работы шва, равные 1 во всех случаях, кроме конструкций, возводимых в климатических районах⁶ I₁, I₂, II₂ и II₃, для которых $\gamma_{wf} = 0,85$ для металла шва с нормативным сопротивлением $R_{wun} = 410$ МПа и $\gamma_{wz} = 0,85$ для всех сталей.

При проектировании соединений с угловыми швами необходимо выбирать сварочные материалы так, чтобы прочности соединения по зоне 2 и зоне 3 была приблизительно одинаковой. Из сопоставления 3.12 и 3.13 можно заключить, что этому требованию удовлетворяют сварочные материалы с расчетным сопротивлением металла шва в соответствии с уравнением 3.14.

$$R_{wz} < R_{wf} \leq R_{wx} \frac{\beta_z}{\beta_f} \dots\dots\dots 3.14$$

3.6. Соединения, выполненные под углом.

⁶ Климатические районы устанавливаются в соответствии с ГОСТ 16350-80. I₁ – очень холодный; I₂ – холодный; II₂ – арктический восточный; II₃ – арктический западный.

В некоторых случаях взаимное расположение деталей в тавровом соединении отличается от 90° . На рис. 3.9 показано сечение таврового соединения, нагруженного силой, действующей вдоль шва.

При расположении деталей таврового соединения под острым или тупым углом расчетная высота шва зависит не только от катета шва, но и от угла наклона φ одной детали по отношению к другой (рис.3.9а).

$$h = K \cos \frac{\varphi}{2} \dots\dots\dots 3.15$$

Расчет таких соединений производят в два этапа: вначале вычисляют среднее значение высоты расчетного сечения, затем определяют размер катета швов с каждой стороны таврового соединения из условия минимизации суммы площадей сечения швов, т.е. минимизации объема наплавленного металла.

Используя обозначения рис.3.9, произведем расчет среднего значения расчетной высоты шва $h_{cp}=0,5(h_1+h_2)$.

$$h_{cp} \geq \frac{N}{2l_{св} R_{wf} \gamma_{wf} \gamma_c} \dots\dots\dots 3.16$$

Далее устанавливают значение высоты шва для каждого шва таврового соединения. На рис 3.9б видно, что при равенстве $h_1=$ катет шва со стороны тупого угла K_2 больше чем со стороны острого K_1 , что ведет к неоптимальному распределению наплавленного металла.

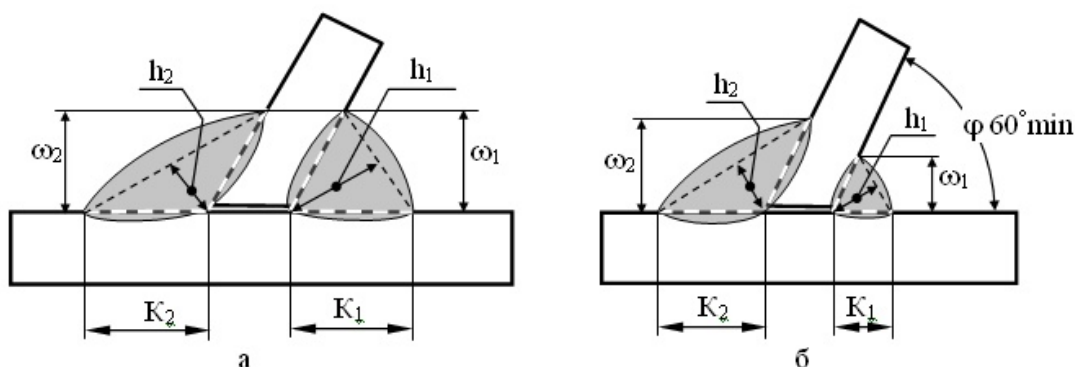


Рис 3.9. Соединение, выполненное под углом: а – $K_1=K_2$; б – $h_1=h_2$.

На основании решения оптимизационной задачи можно показать, что наименьший объем наплавленного металла соответствует следующему соотношению значений h_1 и h_2 .

$$h_1 = \frac{h_{cp}}{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi_1}{2}}; \quad h_2 = \frac{h_{cp}}{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi_2}{2}} \dots\dots\dots 3.17$$

Далее, пользуясь выражением 3.15, определяют размер катета шва, т.к. на производстве более удобно контролировать значение K , чем h .

3.7. Расчет соединений с учетом направления действия силы.

Прочность металла при растяжении, когда сила перпендикулярна плоскости разрушения выше, чем при срезе, когда действующая сила лежит в плоскости разрушения. Прочность металла на срез обычно не превышает 60% от прочности на разрыв. Поэтому расчет угловых швов на срез в некоторых случаях может приводить к избыточному запасу прочности. Это можно проиллюстрировать на рис.3.10. Будем считать, что сварка выполнена без глубокого проплавления и плоскость предполагаемого разрушения (расчетная площадь шва) совпадает с биссекторной плоскостью углового шва. Если действующая сила N направлена перпендикулярно этой плоскости, то действуют нормальные напряжения и прочность соединения определяется прочностью металла шва на разрыв ($R_{wy} = R_y$). По мере изменения угла наклона силы N в расчетной плоскости возрастает величина составляющей касательных напряжений, при угле $\alpha=135^\circ$ в зоне разрушения будут действовать только касательные напряжения и в качестве расчетного сопротивления металла шва необходимо принимать $R_{ws} = 0,58R_y$ (табл. 3.2). Как можно видеть, с изменением направления действующих сил прочность соединений с угловыми швами может изменяться, а упрощенный расчет, учитывающий только касательные напряжения может приводить к излишнему расходу наплавленного металла.

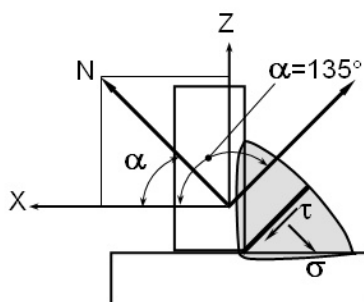


Рис.3.10. Изменение напряженного состояния
в зависимости от направления действующей силы

Теоретические и экспериментальные исследования, проведенные в МВТУ им. Н.Э. Баумана, позволили установить характер изменения несущей способности углового шва в зависимости от угла наклона действующей силы по отношению плоскости разрушения (рис. 3.11) и предложить корректирующий множитель (3.18), учитывающий направление действия силы.

$$[\tau] = C[\tau]_{\alpha=135^\circ}; \quad C = \frac{C_\alpha}{\sqrt{\sin^2 \gamma + C_\alpha^2 \cos^2 \gamma}} \dots\dots\dots 3.18$$

Где: $[\tau]_{\alpha=135^\circ}$ - допускаемое напряжение (расчетное сопротивление)

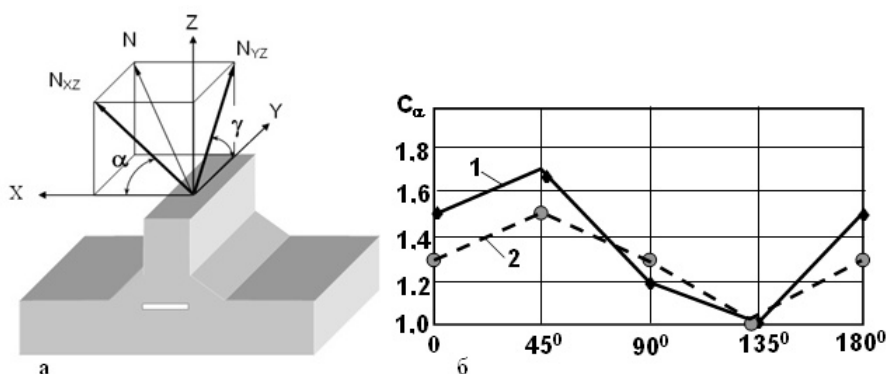


Рис.3.11. Влияние направления силы на прочность углового шва
1 – Расчет по методу МВТУ, 2 – расчет по выражению 3.19.

Аналогичные работы были получены в Великобритании⁷, результатом которых было выдвинуто предложение ввести в расчетные формулы корректирующий коэффициент, назовем его V_α , по аналогии с C_α :

$$V_\theta = (1 + 0,5 \sin^{1,5} \theta) \dots\dots\dots 3.19.$$

⁷ Butler, L. and Kulak, G. "Strength of Fillet Welds as a function of Direction of Load," Welding Journal, Vol. 50, No. 5, 1971, The American Welding Society Research Supplement, pp. 231-s.

Где с учетом принятого отсчета угла на рис. 3.10 и 3.11 $\theta = (\alpha - 135^\circ)$.

Можно видеть, что оба метода отражают одинаковую тенденцию изменения корректирующего множителя, но выражение 3.19 дает более консервативный результат, о чем говорят сами авторы.

Корректирующий множитель по формуле 3.19 используется в некоторых нормативных документах по расчету сварных металлоконструкций^{8 9}. В качестве примера рассмотрим результаты расчета нахлесточных сварных соединений с фланговыми¹⁰ (рис.3.12а) и лобовыми¹¹ (рис.3.12б) угловыми швами по стандарту, рекомендуемому ANSI/AWS D1.1-98.

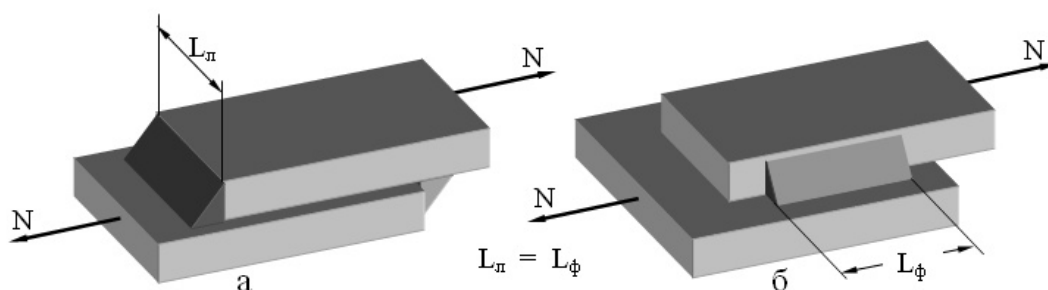


Рис.3.12. Лобовой (а) и фланговый (б) швы.

Будем исходить из равенства длин швов. Швы выполнены ручной дуговой сваркой электродами, обеспечивающие гарантированное значение предела текучести наплавленного металла на уровне $F_{EXX} = 480 \text{ МПа}$. В соответствии с нормами ANSI/AWS D1.1-98 расчетное сопротивление металла шва при заданном направлении действующей силы по формуле:

$$F_V = 0.30 F_{EXX} (1.0 + 0.50 \sin^{1.5} \theta) \dots\dots\dots 3.20.$$

Для лобового шва $\theta = 90^\circ$, для флангового шва $\theta = 0^\circ$, длина шва 0,1м, нагрузка $N = 180 \text{ Кн}$.

Для двух лобовых швов:

сопротивление металла шва – $(F_V)_л = 0.30 \cdot 480 \cdot 1,5 = 216 \text{ МПа}$;

⁸ BS 5950-1:2000 Британский строительный стандарт.

⁹ Стандарт Американского сварочного общества ANSI/AWS D1.1-98 – Сварные строительные конструкции. Стали. (ANSI/AWS D1.1-98 Structural Welding Code: Steel. AWS, 1998, pp. 8, 350-351).

¹⁰ Фланговыми называют сварные швы, продольная ось которых направлена вдоль действия силы.

¹¹ Лобовыми называют сварные швы, продольная ось которых направлена в поперечном направлении к направлению действия силы.

катет шва –

$$K_{\text{л}} = \frac{180(K_{\text{н}})}{216(\text{МПа}) \cdot 2(\text{шва}) \cdot 0,1\text{м}(\text{длина}) \cdot 0,707} = 0,00589\text{м}(5,89\text{мм}) \text{ принимаем: } K_{\text{л}} = 6\text{мм}$$

Для двух фланговых швов:

сопротивление металла шва – $(F_{\text{V}})_{\text{л}} = 0,30 \cdot 480 \cdot 1,0 = 144\text{МПа}$;

катет шва –

$$K_{\text{л}} = \frac{180(K_{\text{н}})}{144(\text{МПа}) \cdot 2(\text{шва}) \cdot 0,1\text{м}(\text{длина}) \cdot 0,707} = 0,0088\text{м}(8,8\text{мм}) \text{ принимаем: } K_{\text{л}} = 10\text{мм}$$

Как видно расчет нахлесточного соединения с лобовыми швами использование норм ANSI/AWS D1.1-98 позволяет уменьшить объем наплавленного металла в 2,8 раза.

При проектировании нахлесточных соединений следует учитывать тот факт, что лобовые швы имеют значительно меньшую податливость, чем фланговые. Вследствие этого в комбинированных соединениях, когда накладка приварена одновременно лобовыми и фланговыми швами, нагрузка распределяется неравномерно и лобовые швы оказываются более нагруженными. В таких соединениях рассчитывать на более высокую прочность лобовых швов рискованно, лучше исходить из предположения, что они также, как и фланговые работают только на срез.

В общем случае при нагружении сварного соединения с угловыми швами в расчетном сечении возникает сложное напряженное состояние и для определения величины эквивалентных напряжений, которые можно сопоставлять с характеристиками прочности металла шва, получаемые при испытании на одноосное растяжение, необходимо пользоваться одной теорией (критериев) прочности. Согласно этой теории прочности опасное состояние материала при сложном напряженном состоянии наступает тогда, когда удельная потенциальная энергия изменения формы достигает величины, соответствующей пределу текучести при простом растяжении (IV теория прочности).

В соответствие с этой теорией компоненты поля напряжений, действующие в расчетной плоскости сечения, заменяют величиной эквивалентного напряжения $\sigma_{\text{экв}}$, которое подсчитывают как:

$$\sigma_{\text{экв}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)} \leq \sigma_m \dots 3.21.$$

Пользуясь этой теорией прочности Международный институт сварки (IIW) предложил метод расчета сварных соединений с угловыми швами, учитывающий сложное напряженное состояние в расчетном сечении шва (рис.3.13).

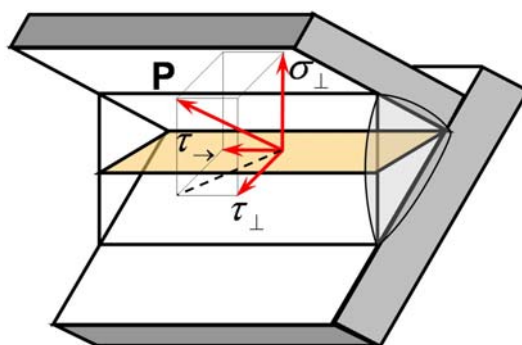


Рис.3.13. Сложное напряженное состояние в расчетном сечении шва.

В основе расчета угловых швов по методу IIW лежит следующее уравнение, полученное из критерия IV теории прочности, но принимают в расчет действие только одной компоненты нормальных напряжений:

$$[\sigma] = \eta \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \dots \dots \dots 3.22.$$

Напряженное состояние характеризуют тремя составляющим (нормальное напряжение и две составляющие касательного напряжения). Рис. 3.13. поясняет обозначения. Левая часть уравнения выражает расчетное сопротивление металла шва разрушению, выраженное в данном случае в виде допускаемых напряжений при одноосном нагружении. Коэффициент η является эмпирическим и зависит от уровня предела текучести металла шва: $\eta=0,7$ при $\sigma_{02}=240\text{МПа}$; $\eta=0,85$ при $\sigma_{02}=390\text{МПа}$; $\eta=1,0$ при $\sigma_{02}=420\text{МПа}$. Как видно величина его повышается с увеличением прочности металла шва.

Метод IIW вошел в европейские и международные нормативные документы, и широко используются в мировой практике. Например, европейский стандарт EN 1993¹² части 1-8 рекомендует при расчете сварных соединений стальных металлических конструкций использовать следующий метод:

$$\sqrt{[\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\rightarrow}^2)]} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \quad \text{и} \quad \sigma_{\perp} \leq \frac{f_u}{\gamma_{M2}} \dots\dots\dots 3.23.$$

Где f_u – номинальное значение предела прочности основного материала, наименее прочной из соединяемых деталей; β_w – корректирующий множитель, зависящий от прочности основного материала на растяжение (табл. 3.4); $\gamma_{M2} = 1,25$ – коэффициент запаса прочности.

Таблица 3.4.

Значение коэффициента β_w
в зависимости от прочности конструкционного материала*

Стандарт и марка стали			Коэффициент корреляции β_w
EN 10025	EN 10210	EN 10219	
S 235 S 235 W	S 235 H	S 235 H	0,8
S 275 S 275 N/NL S 275 M/ML	S 275 H S 275 NH/NLH	S 275 H S 275 NH/NLH S 275 MH/MLH	0,85
S 355 S 355 N/NL S 355 M/ML S 355 W	S 355 H S 355 NH/NLH	S 355 H S 355 NH/NLH S 355 MH/MLH	0,9
S 420 N/NL S 420 M/ML		S 420 MH/MLH	1,0
S 460 N/NL S 460 M/ML S 460 Q/QL/QL1	S 460 NH/NLH	S 460 NH/NLH S 460 MH/MLH	1,0

* В европейских стандартах, приведенных в табл.3.4, цифра, следующая после символа S, обозначает значение предела текучести конструкционного материала в МПа данной группы сталей. Следует иметь в виду, что гарантированные значения предела текучести зависят от толщины металла и с ее увеличением снижаются.

Стандарт предусматривает применение упрощенного метода расчета, когда учитывают только действие касательных напряжений, а присутствие других компонентов игнорируют, но в этом случае в качестве расчетного сопротивления принимают величину предела прочности металла шва на растяжение.

¹² EN 1993 – 1-8. Проектирование стальных конструкций. Проектирование соединений.

3.8. Расчет тавровых соединений, выполненных с разделкой кромок.

В тех случаях, когда расчетный размер шва превосходит 14мм, рекомендуется выполнять тавровые соединения с разделкой кромок с полным или частичным проплавлением (рис. 3.14). Кроме того, по сравнению с соединениями, выполненными без разделки кромок, соединения, выполненные с разделкой кромок, создают в корне шва значительно меньшую концентрацию напряжений.

Расчет таких соединений имеет некоторые отличия. На рис. 3.14 показаны три характерных конструкции, на которых выделены пунктирными линиями расчетные сечения и обозначены параметры, принимаемые в расчет.

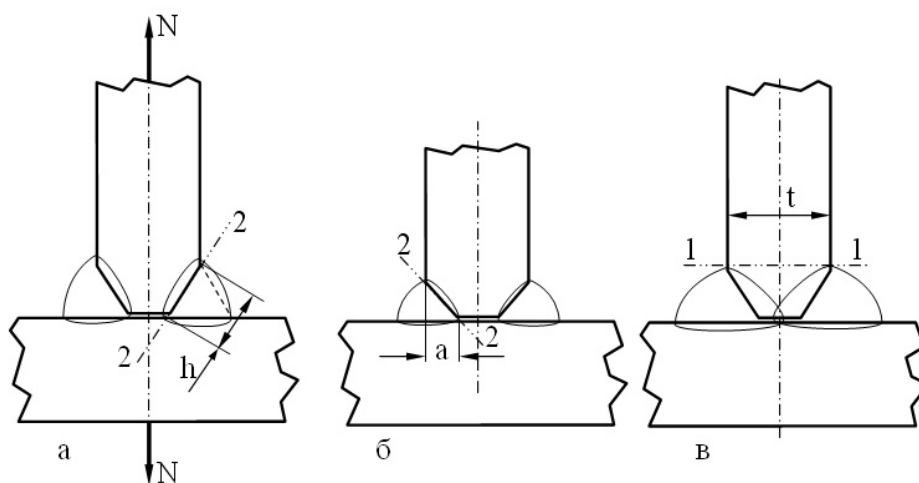


Рис. 3.14. Разновидности тавровых соединений с разделкой кромок:
а – с разделкой кромок под произвольным углом;
б – с углом скоса кромки 45°; в – с полным проплавлением.

Сварные соединения с частичным проплавлением кромок рассчитывают на срез по металлу шва или границы зоны сплавления. СНиП II-23-81 в качестве расчетного параметра рекомендует принимать катет угла разделки «а» (рис.3.14б). Вполне очевидно, что прочность соединения не может больше, чем прочность по зоне 1, поэтому в дополнение необходимо оценить прочность и

этой зоны. СНиП II-23-81¹³ рекомендует следующие расчетные формулы для расчета тавровых соединений с разделкой кромок:

по металлу шва –

$$\frac{N}{2,6hl_w} \leq R_{wf} \gamma_{wf} \gamma_c \dots\dots\dots 3.24;$$

по металлу границы сплавления

$$\frac{N}{2,8hl_w} \leq R_{wz} \gamma_{wz} \gamma_c \dots\dots\dots 3.25;$$

где h - глубина разделки кромок, значения которой следует принимать согласно соответствующему стандарту на основные типы, конструктивные элементы и размеры сварных соединений; l_w - расчетная длина шва, равная полной его длине, уменьшенной на величину, равную толщине стенки t, или полной его длине в случае вывода концов шва за пределы стыка.

В формулах (3.24) и (3.25) учтено наличие двух швов в соединении.

Европейский стандарт EN 1993-1-8 рекомендует расчет сварных соединений с частичной разделкой кромок проводить так же, как и соединений без разделки кромок, используя в качестве расчетного параметра высоту вписанного в сечение шва треугольника.

Для соединений с полным проплавлением расчет выполняют по сечению 1, используя характеристики прочности основного металла, при этом сварочные материалы должны соответствовать по прочности основному металлу.

В том случае, когда тавровое соединение с неполным проплавлением усилено дополнительно наплавкой угловых швов, расчет производят по сечению 2 (рис.3.14а), принимая в качестве расчетной высоты шва размер h.

3.9. Расчет тавровых соединений с учетом возможного расслоения основного металла.

Тавровые соединения с лобовыми угловыми швами, нагруженный растягивающей силой по двум сечениям, следует дополнительно рассчитывать на

¹³ Пособие по расчету и конструированию сварных соединений стальных конструкций (к главе СНиП II-23-81). Утверждено приказом ЦНИИСК им. Кучеренко от 28.11.83 № 372/л.

растяжение по основному металлу в сечении, перпендикулярном направлению действия силы (рис. 3.6, сечение 4).

Такой расчет особенно важно производить для конструкций с толщиной более 20мм из низкоуглеродистых сталей недостаточно хорошо очищенных от вредных примесей, главным образом, серы при производстве металла, для того чтобы исключить появление слоистого разрушения в процессе сварки и последующей эксплуатации конструкции. В данном разделе необходимо отметить, что легкоплавкие вредные примеси при производстве проката превращаются в тонкие пленки, расположенные в плоскости листа, что значительно снижает прочность металла при приложении силы перпендикулярно его поверхности.

Прочность металла в этом направлении получила название «прочность в направлении Z».

Проблемы конструирования сварных соединений с учетом предотвращения слоистых разрушений будут рассмотрены ниже в разделе, относящемся к хрупкому разрушению.

Рассмотрим методы расчета тавровых соединений с учетом возможности разрушения в направлении Z (рис.3.15).

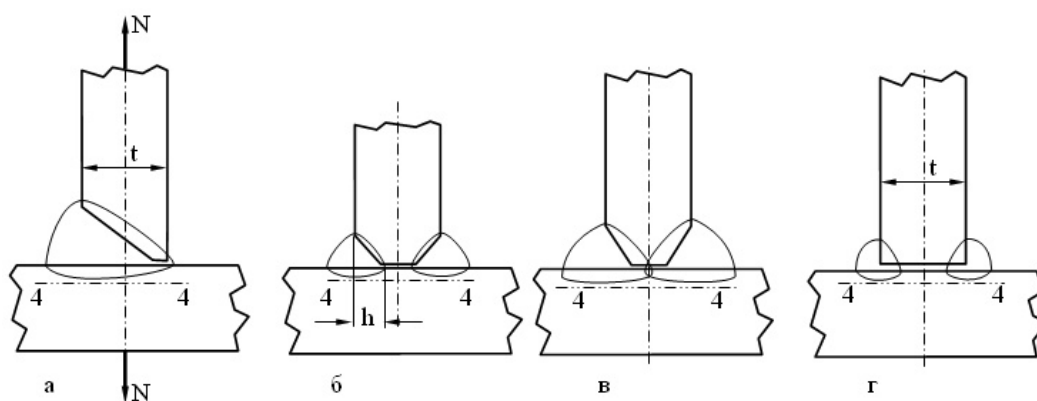


Рис.3.15. Зоны возможного расслоения.

В соединении с двухсторонним швом без разделки кромок (рис. 3.15г) расчет по сечению 4 следует производить по формуле

$$\frac{N}{2,8\beta_f K l_w} \leq R_{th} \gamma_c \dots\dots\dots 3.26;$$

в соединении с двухсторонним швом и к-образной разделкой кромок расчет по сечению 4 следует производить по формулам:

при полном проваре прикрепляемого элемента (рис. 3.15в)

$$\frac{N}{1,3tl_w} \leq R_{th}\gamma_c \dots\dots\dots 3.27;$$

при частичном проваре прикрепляемого элемента (рис. 3.15б)

$$\frac{N}{[2(h + 0,15t)l_w]} \leq R_{th}\gamma_c \dots\dots\dots 3.28;$$

в соединении с односторонним швом и разделкой кромок при полном проваре прикрепляемого элемента (рис. 3.15а) расчет по сечению 4 следует производить по формуле

$$\frac{N}{1,15tl_w} \leq R_{th}\gamma_c \dots\dots\dots 3.29.$$

В формулах 3.26 ... 3.29: l_w - длина шва, принимаемая равной его полной длине; t - толщина прикрепляемого элемента; h - глубина разделки кромок; R_{th} - расчетное сопротивление растяжению в направлении толщины проката, которое следует принимать $R_{th} = 0,5 R_u$.

СНиП II-23-81 допускает не производить расчет соединений по сечению 4 в следующих случаях:

В соединениях с двухсторонним угловым швом без разделки кромок (рис. 3.15г), а также с разделкой кромок и частичным проваром прикрепляемого элемента (рис.3.15б), при условии, что предел прочности основного металла привариваемого элемента меньше или равен пределу прочности второго элемента.

В соединениях с двухсторонним угловым швом и к-образной разделкой кромок (рис. 3.15в) – при условии, что предел текучести основного металла привариваемого элемента не превышает 65% предела текучести второго элемента.

Ниже будут рассмотрены некоторые технологические и конструктивные приемы уменьшения риска слоистых разрушений.

3.10. Технологические ограничения минимального размера катета шва.

В некоторых конструкциях сварные швы могут не передавать нагрузку от одной детали к другой и служат только для их объединения в конструкцию. Такие швы называют «связующими» и расчет размера шва не производят, а принимают исходя из технологических соображений. Этих соображений несколько.

Во-первых, сварные соединения должны обеспечивать целостность конструкции во время транспортировки и монтажа, когда возможно появление нагрузок на связующие швы.

Во-вторых, как будет показано ниже, при сварке возникают сварочные напряжения, которые, также могут приводить к появлению сил в связующих швах.

В-третьих, и это, пожалуй, самая важная причина, по которой требуется ограничение минимального значения катета шва, обусловлена термическим воздействием сварки на основной металл. Эта проблема возникает при проектировании конструкций из низколегированных сталей, причем с увеличением содержания углерода и легирующих элементов она обостряется.

При выполнении швом с малым катетом на металле относительно большой толщины в зоне термического влияния могут появляться хрупкие закалочные структуры вследствие относительно малой погонной энергии при сварке и высокой скорости отвода тепла в металл большой толщины. В сочетании с другими неблагоприятными факторами это может вызвать появление холодных трещин. Другим фактором является то, что швы малого катета выполняют, обычно, на большой скорости, что сопровождается неблагоприятной схемой кристаллизации, и в случае избыточного присутствия вредных примесей в металле шва могут образовываться горячие трещины. Из-за опасности образования холодных трещин ограничивают минимальное значение размера катета при сварке низколегированных сталей. Из-за опасности образования горячих тре-

щин ограничивают минимальное значение размера катета при сварке малоуглеродистых сталей.

В нормативных документах, как правило, минимально допустимый размер катета шва зависит от толщины более толстой свариваемой детали и уровня прочности конструкционной стали.

В таблице 3.5 приведены рекомендации СНиП II-23-81 по определению минимального значения катета шва при сварке в строительстве. Аналогичные ограничения существуют практически во всех российских и международных документах, причем рекомендуемые в них значения достаточно близки между собой.

Таблица 3.5

Минимальные значения катета углового шва, рекомендуемое СНиП II-23-81

Предел текучести материала, МПа	Толщина наиболее толстого элемента, мм				
	6 - 10	11 - 16	17 - 32	23 - 32	33 - 40
225 – 275	4	4	5	5	6
310 – 390	4	5	6	7	8
410 - 440	5	6	7	8	9

Например, на рис. 3.16 для сравнения представлен график, на котором изображены ограничения на размер минимального катета по нормам Американского сварочного общества и по СНиП II-23-81.



Рис.3.16. Рекомендуемое минимальное значение катета углового шва

Немецкие строительные нормы DIN 18000 рекомендуют следующие значения:

$$K_{\min} \geq 1,41(\sqrt{\delta_{\min}} - 0,5), \text{ при } \delta_{\min} \leq 30 \text{ мм}; \quad K_{\min} = 7 \text{ мм при } \delta_{\min} > 30 \text{ мм} \dots 3.30.$$

Данной рекомендации следует руководствоваться не только при определении размера связующих швов, но и в тех случаях, когда расчетное значение оказывается меньше минимального. В последнем случае рекомендуется использовать прерывистые швы, располагая их в цепном, а лучше в шахматном порядке.

Рекомендации по проектированию соединений с прерывистыми швами будут даны ниже.

3.11. Расчет элементов сварных конструкций с угловыми швами.

3.11.1. Соединения с угловыми швами, нагруженные продольной силой в плоскости соединения.

Такие соединения (рис.3.17) встречаются часто при проектировании узлов ферм, колон, для соединения элементов конструкции накладками и др. Нахлесточные соединения выполняют фланговыми швами и комбинированными (фланговые вдоль накладки и лобовые в поперечном направлении). Иногда дополнительно накладки приваривают проплавными или прорезными швами. Соединения стремятся проектировать так, чтобы прочность швов соответствовала прочности поперечного сечения того элемента, который приваривают этими швами, т.е. необходимо стремиться к достижению равенства прочности швов и привариваемых элементов.

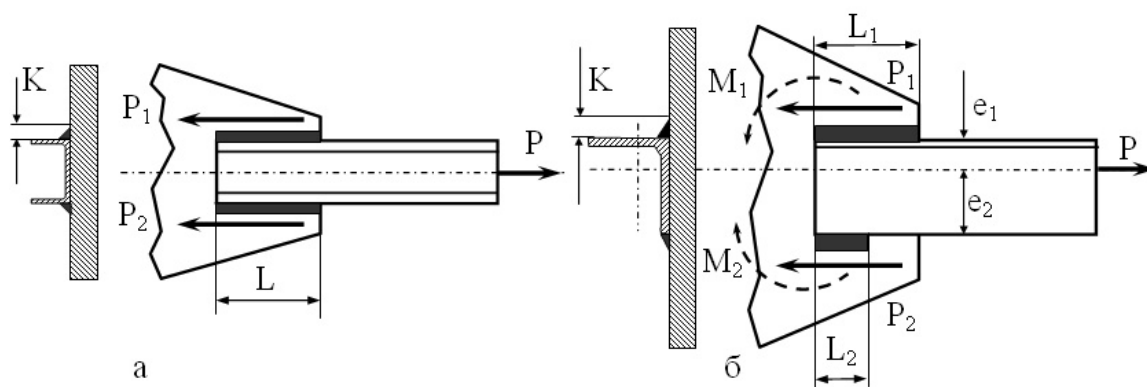


Рис. 3.17. Нахлесточные соединения с фланговыми швами.

И фланговые и лобовые шва рассчитывают на действие только касательных напряжений. Поскольку расчет выполняю в упругой области, предполагается возможность применения принципа аддитивности, т.е. возможность сложения сил, отдельно действующих в каждом шве. Это принцип используется только в том случае, когда металл швов и основной металл нагружен не выше предела текучести.

Проверку проводят по двум возможным плоскостям разрушения – по металлу шва и по металлу границы сплавления. При расчете необходимо учитывать расположение швов по отношению к оси центров тяжести сечений привариваемого элемента.

В общем виде уравнение равновесия выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} P_1 + P_2 = 0 \\ M_1 + M_2 = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} L_{w1}K_1[\tau]_1 + L_{w2}[\tau]_2 = 0 \\ L_{w1}K_1e_1[\tau]_1 + L_{w2}K_2e_2[\tau]_2 = 0 \end{cases} \dots\dots\dots 3.31.$$

$$[\tau] = \min \left\{ \frac{R_{wf}\lambda_{wf}\gamma_c}{R_{wz}\gamma_{wz}\lambda_c} \right\} \dots\dots\dots 3.32.$$

Индексом 1 отмечено все, что относится к шву №1; индексом 2 – к шву №2.

В практических расчетах часто поступают проще. Если для всех швов использовать одинаковые сварочные материалы и принять по конструктивным соображениям одинаковые значения катета шва (обычно его назначают равным толщине металла за минусом величины радиуса галтели сечения прикрепляемого элемента, если она имеется). Затем подсчитывают размер общей длины шва, обеспечивающего заданную несущую способность по уравнению:

$$L_{\Sigma} = L_{\lambda} + L_{\phi 1} + L_{\phi 2} = \frac{P}{K[\tau]} \dots\dots\dots 3.33;$$

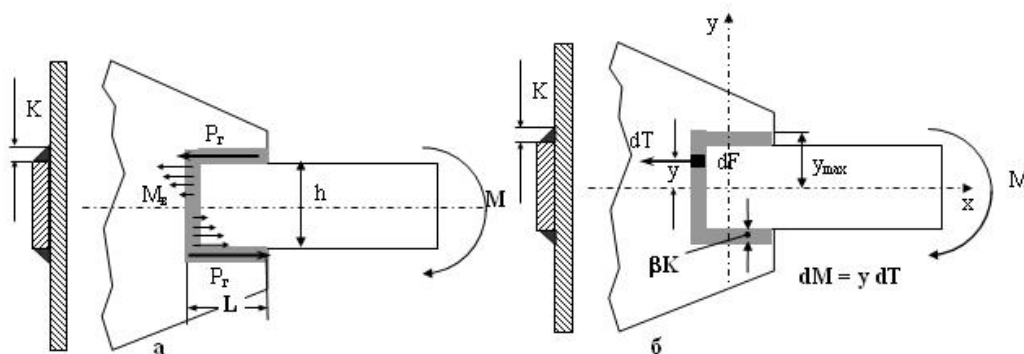
Далее, пользуясь принципом аддитивности, делят L_{Σ} , следующим образом: вначале вычитают длину лобового (или двух лобовых, если они предусмотрены) шва. Длину лобового шва принимают равной ширине накладки. Оставшаяся часть расчетной длины, делят между фланговыми швами обратно пропорционально их расстоянию от оси элемента (рис 3.17б) для того, чтобы выполнить условие $\sum M=0$.

$$L_{\phi 1} = \frac{(L_{\Sigma} - L_{\lambda} - 1)e_2}{e_1}; \quad L_{\phi 2} = (L_{\Sigma} - L_{\lambda} - L_{\phi 2}) \dots\dots\dots 3.34$$

Значения e_1 и e_2 можно найти в справочниках геометрических характеристик профиля проката. Для равнополочных уголков $e_1 = 0,3$, $e_2 = 0,7$. В целях сокращения длины шва L_1 можно увеличить размер катета шва со стороны обуха уголка в 1,1..1,25 раза. Расчет при этом усложняется незначительно.

3.11.2. Расчет нахлесточных соединений, нагруженных моментом в плоскости соединения.

В практике проектирования таких соединений нашли распространение три метода: метод расчленения действующих сил на составляющие (рис.3.18а); метод осевого момента инерции (рис.3.18б) и метод полярного момента инерции (рис.3.18в).



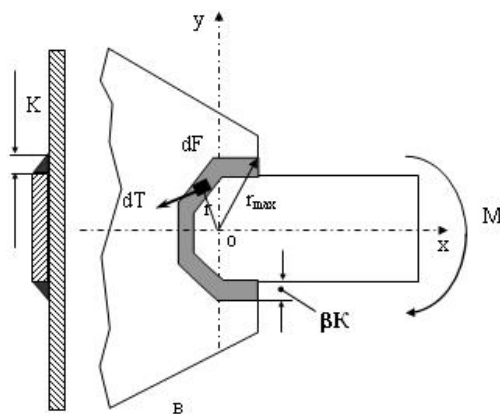


Рис.3.18. Схема расчета: а – метод расчленения сил на составляющие; б – метод полярного момента инерции; в – метод полярного момента инерциию.

Первый метод предполагает, действующему на соединении моменту противодействуют моменты сил, возникающие в расчетном сечении каждого шва:

$$M = M_r + M_b; \dots\dots\dots 3.35$$

$$M_r = P_r(h + K) = \beta K L \tau (h + k); \dots\dots\dots 3.36$$

$$M_b = W \tau = \frac{\beta K h^2 \tau}{6} \dots\dots\dots 3.37$$

Комбинируя 3.35 – 3.37 можно получить уравнение прочности сварного соединения по методу расчленения сил на составляющие:

$$\tau = \frac{M}{\beta K \left[L(h + K) + \frac{h^2}{6} \right]} \leq [\tau] \dots\dots\dots 3.38$$

Рассматривая метод осевого момента инерции, выделим на контуре шва (рис.3.18б) площадку в расчетном сечении шва размером dF на расстоянии y от оси $X - X$. Сила $dT = \tau dF$, возникающая на этой площадке создает момент $dM = ydT = y\tau dF$. Просуммируем элементарные моменты, действующие вдоль контура шва. Если принять условие, что напряжение τ , действующее в шве пропорционально расстоянию от оси $X - X$ и вынести коэффициент пропорциональности τ_1 за знак интеграла, то можно видеть, что значение интеграла выражает осевой момент инерции сечения следа швов $J_x = \int_F y^2 dF$:

$$M = \int_F y \tau dF; \text{ примем } \tau = \tau_1 y; \Rightarrow M = \tau_1 \int_F y^2 dF \dots\dots\dots 3.39$$

Основным уравнением в данном методе является $M = \tau_1 J_x$. Максимальная величина напряжений в шве действует в точке с координатой y_{\max} . Заменим τ_1 на $\tau_{\max} = \tau_1 y_{\max}$ и получим основное уравнение прочности соединения по методу осевого момента инерции:

$$\tau_{\max} = \frac{M}{J_x} y_{\max} \leq [\tau] \dots\dots\dots 3.40$$

Преимуществом данного метода является то, что значения осевого момента инерции табулированы для многих геометрических фигур, что упрощает расчеты.

Метод полярного момента инерции (рис. 3.18в) схож с предыдущим. Основным отличием является то, что в данном методе принята гипотеза о том, что силы возникающие в шве, создают противомомент относительно центра тяжести сечения следа швов. Так же выделим на контуре шва площадку dF на расстоянии r от центра тяжести сечения шва, на которой сила $dT = \tau_1 r$ и проведем вычисления аналогично 3.39, заменив y на r . После преобразования получим основное уравнение в методе полярного момента инерции $M = \tau_1 J_p$, где J_p - полярный момент инерции следа сечения швов.

Основное уравнение прочности соединения по методу полярного момента инерции:

$$\tau_{\max} = \frac{M}{J_p} r_{\max} \leq [\tau] \dots\dots\dots 3.40$$

Значения J_p табулированы для многих геометрических фигур, кроме того, иногда удобно воспользоваться вычислением значения полярного момента инерции через значения осевых моментов инерции ($J_p = J_x + J_y$).

$$\tau_{\max} = \frac{M}{J_x + J_y} \sqrt{x_{\max}^2 + y_{\max}^2} \leq [\tau] \dots\dots\dots 3.41;$$

где x_{\max} , y_{\max} – координаты максимально удаленной точки шва от центра тяжести сечения его следа.

Метод полярного момента инерции рекомендован СНиП II-23-81 для расчета прочности сварных соединений под действием момента в плоскости шва.

3.11.3. Расчет сварных соединений с угловыми швами на действие момента в плоскости, перпендикулярной плоскости расположения швов.

На рис.3.19 приведен пример такого соединения и даны обозначения. Расчет выполняют по двум возможным плоскостям разрушения: по металлу шва и по границе зоны сплавления:

$$\tau_f = \frac{M}{J_{xf}} y_{\max} \leq R_{wf} \lambda_{wf} \gamma_c; \quad \tau_z = \frac{M}{J_{xz}} y_{\max} \leq R_{wz} \gamma_{wz} \gamma_c \dots\dots\dots 3.42;$$

где J_{xf} и J_{xz} - осевой момент инерции соответственно для плоскости, проходящей по металлу шва и по границе сплавления, которые подсчитывают, принимая ширину следа шва как $\beta_f K$ или $\beta_z K$.

Обычно, изгибающий момент в прикрепляющих швах соединения возникает в результате действия поперечных сил, поэтому в большинстве случаев приходится учитывать действие двух силовых факторов: изгибающий момент и перерезывающую силу. Касательные напряжения, обусловленные действием этих силовых факторов, расположены во взаимно перпендикулярных направлениях. Для их совместного учета необходимо выполнить геометрическое суммирование.

Схема расчета представлена на рис.3.19.

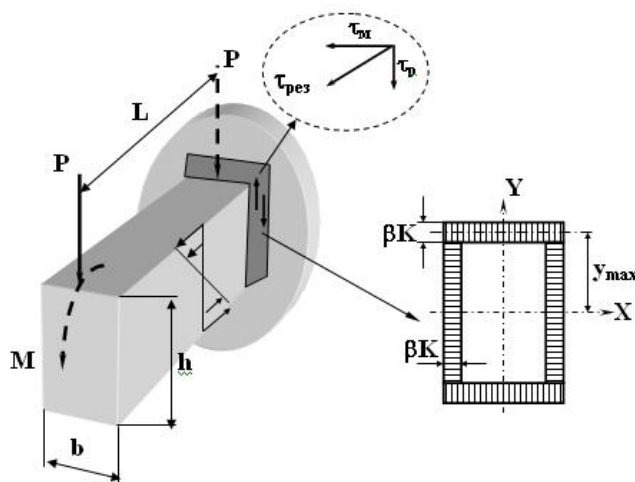


Рис. 3.19. Схема расчета прикрепляющих швов.

При параллельном переносе силы в плоскость шва возникает изгибающий момент $M = PL$. Таким образом в плоскости сечения шва (заштрихованная область) возникают касательные напряжения от момента τ_M и от перерезывающей силы τ_p . Результирующие напряжения равны:

$$\tau_{рез} = \sqrt{\tau_M^2 + \tau_p^2} \leq [\tau] \dots\dots\dots 3.43.$$

Касательные напряжения от действия момента равны:

$$\tau_M = \frac{M}{\beta J_x} y_{max}; \quad J_x = J_x^c + J_x^6; \quad J_x^6 = \frac{Kh^3}{12}; \quad J_x^c = \frac{(b+2K)K^3}{12} + bKy_{max}^2 \dots\dots 3.44$$

При подсчете величины момента инерции горизонтальных швов первый член суммы можно не учитывать, как малозначимый.

Принято считать, что перерезывающую силу воспринимают только швы, расположенные вдоль действия силы. Поэтому,

$$\tau_p = \frac{P}{2\beta Kh} \dots\dots\dots 3.45.$$

В общем виде уравнение прочности сварных соединений с прикрепляющими швами выглядит следующим образом:

$$\tau_{рез} = \sqrt{\left(\frac{M}{J_x} y_{max}\right)^2 + \left(\frac{P}{F_6}\right)^2} \leq [\tau] \dots\dots\dots 3.46$$

В тех случаях, когда сила, действующая на брус, смещена относительно его продольной оси Y (рис. 3.20), помимо изгибающего момента в плоскости шва появляется крутящий момент.

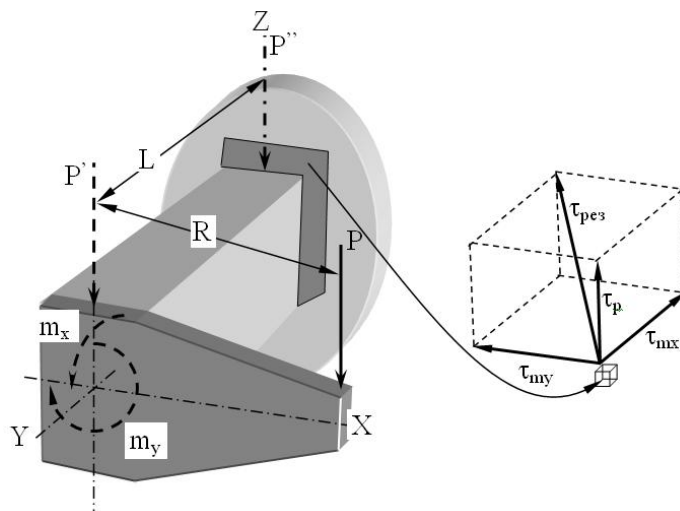


Рис 3.20. Схема расчета прикрепляющих швов сварного соединения под действием трех силовых факторов P , m_y и m_x .

При параллельном переносе действующей силы в плоскость шва появляются два момента: крутящий m_y и изгибающий m_x .

В данном случае касательные напряжения от трех силовых факторов (P , m_y и m_x) действуют в разных плоскостях. Их векторное сложение позволяет выразить результирующие напряжения:

$$\tau_{рез} = \sqrt{\left(\frac{m_y}{J_x + J_z} \sqrt{x_{max}^2 + z_{max}^2}\right)^2 + \left(\frac{m_x}{J_x} z_{max}\right)^2 + \left(\frac{P}{F_6}\right)^2} \dots\dots\dots 3.47.$$

Первое слагаемое выражает касательные τ_{my} напряжения в наиболее удаленной точке сечения (x_{max} ; z_{max}), обусловленное крутящим моментом m_y ; второе слагаемое – касательные напряжения τ_{mx} от изгибающего момента m_x ; третье – τ_p , обусловленное действием силы P .

3.11.4. Расчет поясных швов балок.

В поясных швах сварных балках при поперечном изгибе возникают касательные напряжения τ_Q , действующие вдоль шва (рис.3.21а). Расчет таких швов производят по известной формуле Журавского:

$$\tau_Q = \frac{QS}{2\beta K J_x} \leq [\tau] \dots\dots\dots 3.48;$$

где Q – величина перерезывающей силы; S – статический момент сечения балки, расположенного выше сварных швов (в частном случае полки) относительно оси X ; βK – ширина расчетного сечения углового шва; J_x – момент инерции сечения балки. Если сварные швы выполнены с полным проплавлением стенки, то в качестве ширины расчетного сечения принимают толщину стенки балки $\delta_{ст}$.

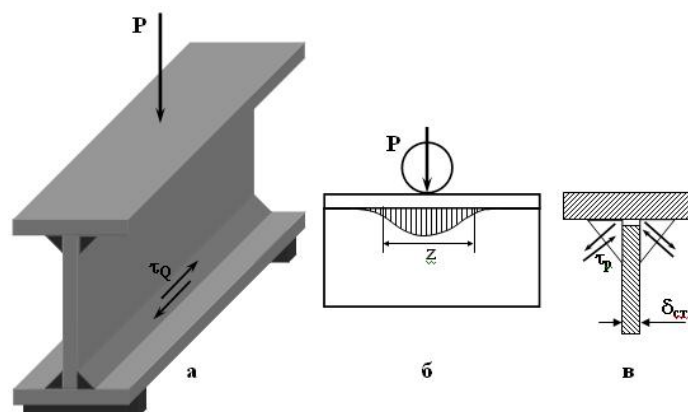


Рис.3.21. Схема расчета поясных швов сварных балок.

Если к поясу балки прикладывают сосредоточенную нагрузку P , например, в виде опорного катка подкрановой тележки, то в поясных швах появляются напряжения, обусловленные тем, что сила P частично передается через плотное прилегание стенки к поясу, частично через шов, т.к. в стыке возможны зазоры.

При расчете напряжений от силы P в качестве длины участка, который передает нагрузку через шов, принимают размер z , определяемый методом теории упругости.

$$z = 3,25 \sqrt{\frac{J_n}{\delta_{cm}}} \dots\dots\dots 3.49$$

где J_n – момент инерции полки относительно собственной оси; δ_{cm} .

Напряжение от силы P определяют с учетом корректирующего множителя n ($n = 0 \dots 1,0$, рекомендуется $n = 0,4$), учитывающего частичное отпирание полки на стенку:

$$\tau = \frac{nP}{2\beta K z} \dots\dots\dots 3.50;$$

с учетом векторного сложения касательных напряжений от силы P и от перерезывающей силы Q уравнение прочности сварных поясных швов выглядит следующим образом:

$$\tau_{рез} = \sqrt{\tau_Q^2 + \tau_p^2} \leq [\tau] \dots\dots\dots 3.52.$$

В тех случаях, когда расчетное значение поясных швов, оказывается меньше минимально допустимого по технологическим соображениям размера, применяют прерывистые швы. Размер катета прерывистого шва определяют в зависимости от длины участков шва и шага прерывистых швов:

$$\tau_Q = \frac{QS}{2\beta K J_x} \cdot \frac{t}{l_{шв}} \leq [\tau] \dots\dots\dots 3.53$$

3.12. Расчет элементов сварных конструкций с точечными швами.

Сварные соединения, выполненные контактной точечной сваркой, имеют весьма широкое распространение при проектировании тонколистовых конструкций благодаря значительно большей производительности контактной сварки по сравнению с другими способами. Сварные соединения проектируют так, чтобы они работали на сдвиг (рис.3.22а), поскольку прочность точечных соединений на отрыв (рис.3.22б) значительно ниже из-за высокой концентрации напряжений в периферийной части соединения.

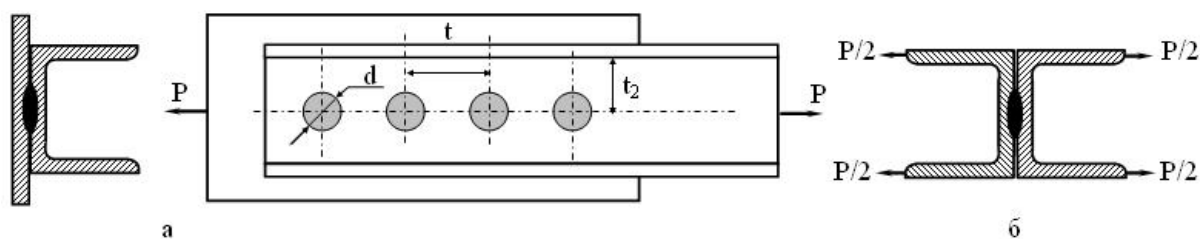


Рис.3.22. Точечные соединения, работающие на сдвиг (а) и на отрыв (б)

Основные размеры конструктивных элементов соединения устанавливают в соответствии с ГОСТ 15878-79 (приложение 4.2, глава 2).

Допускаемые напряжения определяют в зависимости от допускаемых напряжений для основного металла: $[\tau]_T \leq 0,5[\sigma]$; $[\sigma]_{от} = (0,25 \dots 0,30)[\sigma]$.

Уравнения прочности соединения, выполненного контактной точечной сваркой:

при работе на сдвиг

$$\tau = \frac{P}{n \frac{\pi d^2}{4}} \leq [\tau]_T \dots \dots \dots 3.54;$$

при работе на отрыв

$$\sigma = \frac{P}{n \frac{\pi d^2}{4}} \leq [\sigma]_{от} \dots \dots \dots 3.55.$$

При расчете соединений, нагруженных моментом в плоскости соединения, используют метод, при котором ход рассуждений похож на метод осевого момента инерции (рис.3.23).

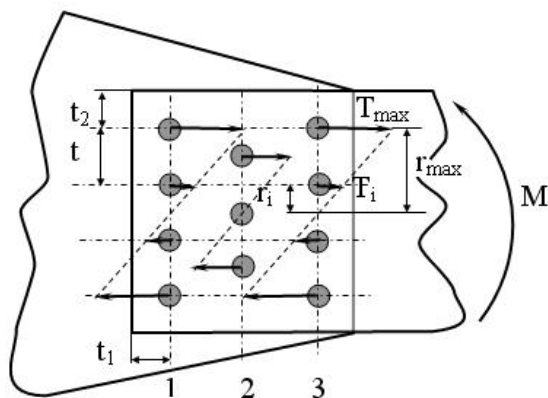


Рис.3.23. Схема расчета соединения, нагруженного моментом в плоскости соединения.

В каждом ряду точек определяют сумму моментов сил от касательных напряжений в каждой точке.

$$\Sigma m_i = \Sigma T_i r_i = \Sigma r_i \tau_i \frac{\pi d^2}{4}; \text{принимая } \tau_i = \tau_1 r_i \Rightarrow \Sigma m_i = \tau_1 \Sigma r_i^2 \frac{\pi d^2}{4} \dots\dots\dots 3.56;$$

где r_i – координата i – той точки в ряду относительно горизонтальной оси;
 τ_i – касательное напряжение в i – той точке; τ_1 – единичное значение касательных напряжений.

Далее необходимо просуммировать моменты от касательных напряжений в отдельных рядах точек:

$$M = \tau_1 \frac{\pi d^2}{4} \sum_{l=k} \sum_i r_i^2 \dots\dots\dots 3.57;$$

где – k – число рядов точек.

С учетом линейной зависимости касательных напряжений от координаты точек $\tau_{\max} = \tau_1 r_{\max}$, определим величину касательных напряжений в наиболее удаленной точке с координатой r_{\max} и запишем уравнение прочности нахлесточного точечного сварного соединения в следующем виде:

$$\tau_{\max} = \frac{4M}{\pi d^2 \sum_k \sum_i r_i^2} r_{\max} \leq [\tau]_r \dots\dots\dots 3.58.$$

Точечную сварку часто применяют при изготовлении облегченных тонкостенных балок из холодногнутых профилей (рис.3.24).

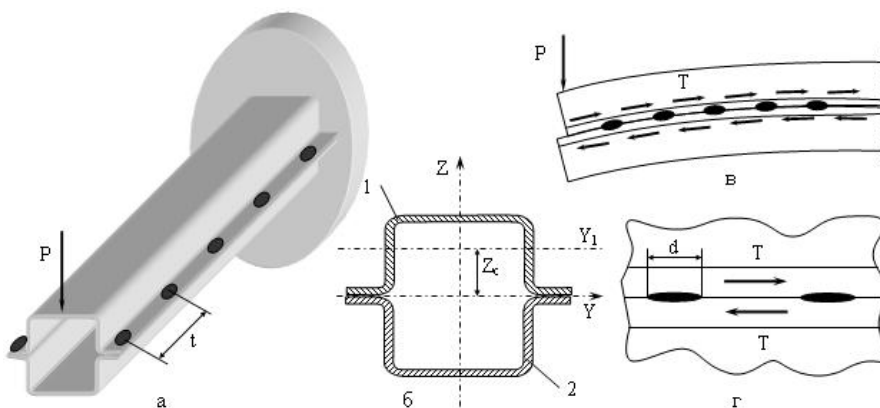


Рис.3.24. Схема расчет сварных точечных соединений, нагруженных касательными силами при поперечном изгибе балки.

Поперечный изгиб балки вызывает появление в плоскости соединения сдвиговой силы T , которая на длине шага t и воспринимается соединением в пределах точки, т.е. на участке длиной d . В соответствии с формулой Журавского сдвиговую силу, накопленную на длине шага точек и воспринимаемую точками в каждом поперечном сечении соединения, можно определить:

$$T = \frac{QS}{J_y} \cdot \frac{t}{d} \dots\dots\dots 3.59;$$

Разделив накопленную силу на площадь точек, попадающих в сечении можно записать уравнение прочности сварных точечных соединений балки:

$$\tau = \frac{T}{2F_T} = \frac{QS}{2 \frac{\pi d^2}{4}} \cdot \frac{t}{d} = \frac{2QS}{\pi d^3} \leq [\tau]_T \dots\dots\dots 3.60$$

где F_T – площадь одной точки диаметром d ; Q – перерезывающая сила; S – статический момент части сечения, расположенного выше плоскости соединения относительно собственной оси Y_1 , в частном случае (рис. 3.24) $S = F_{\text{сеч}} Z_c$; $F_{\text{сеч}}$ – площадь поперечного сечения части балки, расположенной выше плоскости соединения.

Пример расчета соединений, выполненных точечной сваркой, является частным случаем расчета соединений с прерывистыми швами, независимо от того каким методом сварки они выполняются.

3.13. Контрольные вопросы.

1. С какой целью при расчете конструкций назначают коэффициент запас прочности, что выражает и от чего зависит его величина при расчете по допускаемым напряжениям?
2. С какой целью при расчете сварных соединений назначают коэффициент прочности сварного соединения, от чего зависит его величина?
3. Что такое расчет конструкций по предельному состоянию, что означает предельное состояние конструкции, какие предельные состояния рассматрива-

ют при выполнении расчета, в чем преимущества данного метода расчета по сравнению с расчетам по допускаемым напряжениям?

4. Что принимают в качестве расчетного сечения при расчете сварных стыковых соединений, как проводят расчет стыковых соединений, выполненных с неполным проплавлением кромок или прерывистыми швами?

5. По каким расчетным сечениям проводят проверку прочности сварных соединений с угловыми швами?

6. Что принимают в качестве катета углового шва при расчете сварных соединений с угловыми швами?

7. В чем отличие расчета угловых швов по металлу шва и по границе зоны сплавления?

8. С какой целью при определении высоты расчетного сечения угловых швов вводят коэффициент β , что он выражает, от чего зависит его величина?

9. Какие существуют технологические возможности уменьшить размер катета углового шва при сохранении прочности соединения и какие должны быть даны указания в конструкторской документации, чтобы обеспечить возможность сохранения расчетной прочности?

10. В чем особенность проектировании и расчета сварных соединений деталей, расположенных под углом друг к другу, отличающемся от 90° ?

11. В чем особенность расчета сварных тавровых соединений, выполненных с разделкой кромок?

12. В каких случаях можно предполагать разрушение тавровых соединений в результате расслоения основного металла в зоне шва и как проводят проверку прочности соединения с учетом возможности такого разрушения?

13. По каким причинам ограничивают минимальное значение катета шва и, от чего зависит это значение?

14. Как влияет направление действия силы на прочность соединения с угловыми швами, какие существуют методы расчета прочности угловых швов, учитывающие направление действия силы?

15. В чем состоит суть методов расчета сварных конструкций, нагруженных моментом в плоскости соединения?

16. В чем особенность расчета прикрепляющих швов, нагруженных несколькими силовыми факторами (силой, изгибающим, крутящим моментом)?

17. В чем особенность расчета сплошных и прерывистых поясных швов балок, нагруженных поперечным изгибом?

18. Как учитывается в расчете угловых швов асимметрия сечения элемента, привариваемого угловыми швами?

19. Особенности расчета соединений, выполненных контактной сваркой, как определяют величину допускаемых напряжений при расчете на срез и на отрыв?

20. В чем состоит суть методов расчета сварных точечных соединений, нагруженных моментом в плоскости соединения?

21. В чем особенность расчета сварных точечных соединений составных балок?