Занятие 105 – 106

Расчет сварных соединений.

Задание: ответить на вопросы.

Вопросы:

1- Как рассчитываются сварные соединения на прочность?

2- Какие упрощающие допущения принимают при написании формул для расчета прочности угловых швов в различных случаях нагружения?

3- Какие факторы влияют на прочность сварных соединений?

4- Какие факторы учитывают при выборе допускаемых напряжений для расчетов на прочность сварных соединений?

5- На практике встречается случай, когда по расчету *lш*> *b* (*b* — ширина детали). Какое решение следует принять в этом случае?

6- Почему в формуле (4) в знаменателе принято 0,7*Klш*?

**Основной материал:**

### *Расчет сварных соединений на прочность*

Прочность сварного соединения зависит от следующих основных факторов: качества основного материала, определяемого его способностью к свариванию, совершенства технологического процесса сварки; конструкции соединения; способа сварки; характера действующих нагрузок (постоянные или переменные). Хорошо свариваются низко- и среднеуглеродистые стали. Высокоуглеродистые стали, чугуны и сплавы цветных металлов свариваются хуже. Значительно снижают прочность такие пороки сварки, как непровары и подрезы (рис. 17.1), шлаковые и газовые включения, скопление металла в месте пересечения швов и т. п. Эти дефекты являются основными причинами образования трещин как в процессе сварки, так и при эксплуатации изделий. Влияние технологических дефектов сварки значительно усиливается при действии переменных и ударных нагрузок.



**Рис. 17.1**

Эффективными мерами повышения прочности сварных соединений являются: автоматическая сварка под флюсом и сварка в защитном газе; термообработка сваренной конструкции (отжиг); наклеп дробью и чеканка швов. Эти меры позволяют повысить прочность составных сваренных деталей при переменных нагрузках в 1,5–2 раза и даже доводить ее до прочности целых деталей.

Многообразие факторов, влияющих на прочность сварных соединений, а также приближенность и условность расчетных формул вызывают необходимость экспериментального определения допускаемых напряжений. Принятые нормы допускаемых напряжений для сварных соединений деталей из низко- и среднеуглеродистых сталей,  а также  низколегированных сталей  (типа 14ГС, 15ГС, 15ХСНД, 09Г2, 19Г и пр.) при статических нагрузках см. в табл. 3.

**Таблица 3.**Допускаемые напряжения для сварных соединений деталей

из низко- и среднеуглеродистых сталей при статической нагрузке

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Вид деформации, напряжение | Автоматическая и полуавтоматиче­ская сварка под флюсом | Ручная дуговая электродами |
| Э50А, Э42А | Э50, Э42 |
| Растяжение [σ’]р | [σ’]р | [σ’]р | 0,9[σ’]р |
| Сжатие [σ’]сж | [σ’]р | [σ’]р | [σ’]р |
| Срез [τ’]ср | 0,65[σ’]р | 0,65[σ’]р | 0,6[σ’]р |

В зависимости от вида сварного соединения и сварки принятые допускаемые напряжения  для сварных швов  понижаются  путем умножения их на коэффициент φ (таблица 4).

**Таблица 4.** Значения коэффициента φ в зависимости от вида сварного соединения и сварки

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Вид сварного соединения | Вид дуговой сварки | φ |
| Стыковое с двусторонним проваром | Автоматическая под флюсом | 1,00 |
| Ручная, выполненная качественным электродом | 0,95 |
| Ручная с повышенными требованиями контроля | 1,00 |
| Стыковое на подкладке | Ручная | 0,90 |
| Стыковое при одностороннем шве | Автоматическая под флюсом | 0,80 |
| Ручная | 0,70 |
| Тавровое со сплошным проваром | Автоматическая под флюсом | 1,00 |
| Ручная | 0,70 |
| Тавровое с угловыми швами без сплошного провараВнахлестку с двумя швами | Автоматическая под флюсом или ручная | 0,80 |

**Таблица 5.** Значения эффективных коэффициентов концентрации напряжений для сварных швов

|  |  |
| --- | --- |
| Сварной шов | Коэффициент *k*σ(*k*τ) для стали |
| углеродистой | низколегированной |
| Стыковой с полнымпроваром корня шва | при автоматической и ручной сварке и контроле швов | 1 | 1 |
| при ручной сварке без контроля качества шва | 42 | 1,4 |
| при автоматической сварке без контроля качества шва | 1,1 | 1,2 |
| Угловой лобовой | при ручной сварке | 2,3 | 3,2 |
| при автоматической сварке | 1,7 | 2,4 |
| Угловой фланговый шов, работающий на срезот осевой силы | 3,4 | 4,4 |

Допускаемые напряжения при периодическом нагружении

σ*Rp*=γσ*p*,

τ*Rp*=γτ*p*,

где γ <1 - коэффициент понижения допускаемых напряжений,

γ=1/[(*ak*σ+*b*)-(*ak*σ-*b*)*R*]≤1,                           (1)

где *k*σ(*k*τ) - эффективный коэффициент концентрации нормальных (касательных) напряжений (см. таблицу 5);

*а*, *b* - коэффициенты (для углеродистых сталей *а*=0,58, *b*=0,26; для низколегированных *а*=0,65, *b*=0,3).

Коэффициент асимметрии цикла *R* определяют как отношение наименьшего и наибольшего по абсолютному значению напряжений и сил, взятых со своими знаками:

*R*=*R*σ=σmin/σmax=*F*min/*F*max,

*R*=*R*τ=τmin/τmax=*F*min/*F*max.

Если при вычислении γ по формуле (1) получают γ > 1, то в расчет принимают  γ =1. Это обычно получается при большой асимметрии цикла (*R*> 0) и указывает на то, что для данного цикла решающее значение имеет не сопротивление усталости, а статическая прочность.

Все принятые в инженерной практике методы расчета сварных соединений являются приближенными, дающими возможность получить решение с меньшей затратой времени.

Сварные швы разделяют на **рабочие** и **связующие**. **На** **прочность рассчитывают** только **рабочие швы**, которые воспринимают и передают рабочую нагрузку между соединяемыми деталями. Связующие швы служат только для связи элементов в неразъемную конструкцию. Они мало нагружены и их не рассчитывают.

Например, на рис.17.2 рабочими являются швы (№1) крепления консоли 2 к колонне 1; связующими – швы (№2) соединения полок и стойки консоли, швы (№3) соединения стенки 3 и консоли, швы (№4) сварки площадки 4 с полкой консоли.



**Рис.17.2**

### *Расчет сварных стыковых соединений*

Швы этих соединений работают на растяжение, сжатие и изгиб в зависи­мости от направления действующей нагрузки (рис.13*). Основ­ным критерием работоспособности*стыковых швов является их *прочность шва или околошовной зоны.*

При расчёте стыковых швов высоту шва принимают равной толщине свариваемого металла, независимо от наличия выпуклости (усиления) или вогнутости (ослабления или мениска).

Сварные соединения встык являются наиболее рациональными,  приближающими по форме и прочности составные детали к целому изделию.

При хорошем качестве провара шва стык обеспечивает состояние, близкое к равнопрочности сварного шва и детали при статическом нагружении.

Стыковое соединение во многих случаях является наиболее простым и надежным. Его следует применять везде, где допускает конструкция изделия. В зависимости от толщины соединяемых деталей соединение выполняют с обработкой или без обработки кромок, с подваркой и без подварки с другой стороны (рис. 18).



**Рис.18**

При малых толщинах обработка кромок не обязательна, а при средних и больших толщинах она необходима по условиям образования шва на всей толщине деталей. Автоматическая сварка под флюсом позволяет увеличивать предельные толщины листов, свариваемых без обработки кромок, примерно в два раза, а угол скоса кромок уменьшить до 30–35° (на рис. 18 показаны швы, выполняемые при ручной сварке).

Сварить встык можно не только листы или полосы, но также трубы, уголки, швеллеры и другие фасонные профили. Во всех случаях составная деталь получается близкой к целой.

Предполагают, и это подтверждают испытания, - что при нагружении шов разрушается в зоне термического влияния.

***Зоной термического влияния*** называют прилегающий к шву участок детали, в котором в результате нагрева при сварке изменяются механические свойства металла. Понижение механических свойств в зоне термического влияния особенно значительно при сварке термически обработанных, а также наклепанных сталей. Для таких соединений рекомендуют термообработку и наклеп после сварки. Практикой установлено, что при качественном выполнении сварки разрушение соединения стальных деталей происходит преимущественно в зоне термического влияния. Поэтому расчет прочности стыкового соединения принято выполнять по размерам сечения деталей в этой зоне. Возможное снижение прочности деталей, связанное со сваркой, учитывают при назначении допускаемых напряжений.

Нагрузку, приложенную к сварочному шву, считают равномерно распределённой по всей длине шва, поэтому длину ограничивают шириной свариваемых деталей. В то время как измерения, выполненные на реальных швах, свидетельствуют о существенной неравномерности распределения нагрузки по длине шва, для большинства их типов.

Распределение напряжений по толщине шва — неравномерное.

Стыковые швы могут воспринимать произвольно направленные нагрузки и моменты.

При  конструировании стыковых швов необходимо решить вопрос о способе разделки кромок и в соответствии с этим выбрать буквенно-цифровое обозначение шва.

При действии на соединение нескольких силовых факторов применяют метод независимости действия сил (метод  суперпозиции), т.е. определяют напряжение от каждого силового фактора отдельно, а затем расчет ведут по эквивалентным напряжениям: обычно — по четвертой теории прочности:



где  σΣ - наибольшее суммарное нормальное напряжение в шве;

        τΣ - наибольшее суммарное касательное напряжение в шве;

        [σ]p - допускаемое напряжение для сварного шва.

***Проверочный расчет***прочности стыкового шва.

Условие прочности на растяжение:



где *—*расчетноеи допускаемое напряжения на растяжение для шва (табл. 3); *F —*нагрузка, действующая на шов; δ — толщина детали (толщину шва принимают равной толщине детали); *l*ш — длина шва.

Условие прочности на изгиб:



Отношение  к допускаемому напряжению на растяжение для основного металла детали [σ]р. является коэффициентом прочности сварного соединения:



Величина φ колеблется в пределах 0,9–1,00, т. е. стыковое соединение почти равнопрочно с соединенными деталями. В тех случаях, когда требуется повысить прочность соединения, применяют косые швы (рис. 18.1). Расчет косого шва выполняют по формулам (2) и (2.1), в которых принимают .



**Рис. 18.1. Косой стыковой шов**

***Проектировочный расчет.***Целью этого расчета является определение длины шва.

Исходя из основного условия прочности (2), длину стыкового шва при действии растягивающей силы определяют по формуле



### *Расчет сварных соединений внахлестку*

Сварные соединения внахлестку выполняют угловым (валиковым) швом (рис.19). Угловые швы соединения внахлестку могут воспринимать произвольно направленные силы и моменты.

Соединения обычно воспринимают нагрузку в плоскости стыка.

Угловые швы соединений внахлестку могут иметь сечения: нормальные (треугольные), выпуклые и вогнутые. Наиболее целесообразный с точки зрения снижения концентрации напряжений и в условиях работы при переменных во времени нагрузках шов — вогнутый, но — и наиболее сложный в изготовлении. Вогнутость шва достигается обычно механической обработкой, которая значительно увеличивает стоимость соединения. Поэтому такой шов применяют только в особых случаях, когда оправдываются дополнительные расходы. Выпуклый шов также сложен в изготовлении, имеет повышенную концентрацию напряжений и применяется в специальных случаях. Наиболее распространенное сечение шва – нормальное (треугольное).

Основные геометрические характеристики поперечного сечения нормального углового шва – катет *k*и расчетная высота – β*k*. Величина последней по сути есть глубина проплавления соединяемых деталей, зависящая от технологического процесса сварки. При ручной и многопроходной автоматической или механизированной сварке β=0,7; при двух- и трехпроходной механизированной сварке β=0,8; при двух- и трехпроходной автоматической, а также однопроходной механизированной сварке β= 0,9; для однопроходной автоматической сварки β=1,1.

В большинстве случаев *k* = *δ*min, где *δ*min – меньшая из толщин свариваемых деталей. По условиям технологии *k* ≥ 3 мм, если *δ*min≥ 3 мм. Максимальная величина катета не ограничивается, однако швы с *k* > 20 мм используются редко.

Разрушение углового шва происходит по сечению m – m (рис. 19). Площадь опасного сечения шва равна βk*l*, где *l* – длина шва.



**Рис.19**

При использовании угловых швов расчет ведут при следующих предположениях (допущениях):

1.Свариваемые детали — абсолютно жесткие: деформируются под нагрузкой только швы.

2. Под действием крутящих моментов происходит поворот соединенных деталей относительно центра тяжести сварного стыка в пределах упругих деформаций шва.

3. В опасном сечении шва возникает сложное напряженное состояние. Однако расчет угловых швов при любом способе напряжений ведут по касательным напряжениям. Нормальные напряжения не учитывают.

4. Считают касательные напряжения равномерно распределенными по высоте опасного сечения hоп = 0,7k.

5. Опасное сечение углового шва расположено под углом 45˚.

6. Вид сварки выбран правильно, а  качество детали и шва удовлетворяет нормам расчета соединений с угловым швом.

При конструировании соединений следует, если можно, избегать разных толщин соединяемых деталей.

В зависимости от расположения различают швы ***лобовые*, *фланговые*** и ***косые*.**

Лобовой шов расположен перпендикулярно, а фланговый – параллельно линии действия нагружающей силы. Обычно применяют комбинированное соединение фланговыми и лобовыми швами. Рассмотрим вначале соединения только фланговыми и только лобовыми швами, а затем кобинированное соединение.

*Фланговые швы* (рис. 19.1). Основными напряжениями флангового шва являются касательные напряжения m в сечении m – m. По длине шва напряжения τ распределены неравномерно. На концах шва они больше, чем в середине. Неравномерность распределения напряжений объясняется следующим. Предположим, что деталь 2 абсолютно жесткая, а деталь 1 и швы податливые. Тогда относительное перемещение точек *b*под действием силы F больше относительного перемещения точек *a* на величину удлинения детали *l*на участке *аb*. При этом деформация сдвига и напряжения в шве непрерывно уменьшаются по всей длине шва справа налево. Если обе детали упругие, но жесткость их различна, то напряжения в шве распределяются по закону некоторой кривой, показанной на рис. 19.1. При одинаковой жесткости деталей эпюра напряжений симметрична. Учитывая податливость деталей, можно вычислить напряжения в любом сечении по длине шва. Ясно, что неравномерность распределения напряжений возрастает с увеличением длины шва и разности податливостей деталей. Поэтому применять длинные фланговые швы нецелесообразно.



**Рис.19.1**

В практике длину фланговых швов ограничивают условием 30 мм ≤*l* ≤ 50*k*. При разработке конструкции соединения внахлестку фланговыми швами из условия равнопрочности шва и основного металла рекомендуется применять величину нахлестки не более *l*н=1,2*b*, а при соединении комбинированным швом — не более *l*н=0,7*b*, где *b*- расстояние между фланговыми швами.

Расчет таких швов приближенно выполняют по среднему напряжению, а условия прочности записывают в виде



В тех случаях, когда короткие фланговые швы недостаточны для выполнения условий равнопрочности, соединение усиливают прорезными швами (рис. 19.2) или лобовым швом (см. ниже). Условие прочности соединения с прорезным швом при *k*=*δ*





**Рис.19.2**

Если одна из соединяемых деталей асимметрична, то расчет прочности производят с учетом нагрузки, воспринимаемой каждым швом. Например, к листу приварен утолок (рис. 19.3), равнодействующая нагрузка *F*проходит через центр тяжести поперечного сечения уголка и распределяется по швам обратно  пропорционально плечам *е*1 и *е*2. Соблюдая условие равнопрочности, швы выполняют с различной длиной так, чтобы



При этом напряжения в обоих швах





**Рис.19.3**

Если соединение нагружено моментом (рис. 19.4), то напряжения от момента распределяются по длине шва неравномерно, а их векторы направлены различно (рис. 19.4, *а*) (напряжения пропорциональны плечам *е*и перпендикулярны им). Неравномерность распределения напряжений тем больше, чем больше *l*/*b*. В общем случае максимальные напряжения можно определить по формуле



где *W*ρ – полярный момент сопротивления опасного сечения швов в плоскости разрушения.

Для сравнительно коротких швов (*l*<*b*), распространенных на практике, применяют приближенный расчет по формуле



При выводе этой формулы условно полагают, что напряжения направлены вдоль швов и распределены по длине швов равномерно (рис. 19.4, *б*).



**Рис.19.4**

*Лобовые швы* (рис.19.5). Напряженное состояние лобового шва неоднородно. Наблюдается значительная концентрация напряжений, связанная с резким изменением сечения деталей в месте сварки и эксцентричным приложением нагрузки. Основными являются касательные напряжения *τ* в плоскости стыка деталей и нормальные напряжения σ в перпендикулярной плоскости.

По методу, принятому в инженерной практике, лобовые швы рассчитывают только по *τ*. За расчетное сечение, так же как и во фланговых швах, принимают сечения по биссектрисе m – m. Разрушение швов именно по этому сечению подтверждает практика. При этом



Такая условность расчета тоже подтверждается практикой. Расчет лобовых швов только по *τ* и сечению m – m делает расчет всех угловых швов единым независимо от их расположения к направлению нагрузки.

Все угловые швы рассчитывают только по *τ* в сечении m – m. Это практически удобно и упрощает расчеты.



**Рис.19.5**

*Косой шов* (рис. 19.6). В случае применения нахлестки, выполненной косым швом, угол наклона шва α из условия равнопрочности шва и основного металла принимают близким к 30˚.

Условие прочности





**Рис.19.6**

На рис. 19.7 изображен случай, когда соединение лобовым швом нагружено моментом. При этом напряжения σma по торцу полосы распределяются подобно тому, как распределяются нормальные напряжения в поперечном сечении балки при изгибе. Переходя к ранее рассмотренному условному расчету лобовых швов по касательным напряжениям, получаем:





**Рис.19.7**

*Комбинированные соединения лобовыми и фланговыми швами* рассчитывают на основе принципа распределения нагрузки пропорционально несущей способности отдельных швов. При этом для соединения, изображенного на рис. 19.8, получим





**Рис.19.8**

На рис. 19.9 показан случай, когда соединение нагружено моментом и силой.



**Рис.19.9**

При расчете такого соединения величина касательных напряжений от момента*Т* может быть определена по полярному моменту инерции опасного сечения швов (рис. 19.10). В приближенных расчетах полагают, что сопротивление комбинированного шва моменту *Т*равно сумме сопротивлений, составляющих швов:

*T*= *T*ф + *T*л,

где *T*ф и *Т*л – моменты, воспринимаемые фланговыми и лобовым швами.



**Рис. 19.10**

Если учесть, что по условиям равнопрочности необходимая длина фланговых швов *l*ф в комбинированном соединении не превышает 0,5*l*л, то можно применить формулу  для определения *T*ф= τф𝛽*kl*ф*l*л. Для определения *Т*л используем формулу  и запишем Tл= τл𝛽*kl*л2/6.

Место пересечения швов принадлежит и лобовому, и фланговому швам. Здесь τф=τл. Обозначая это напряжение τT, после подстановки в *T*= *T*ф + *T*л  и несложных преобразований получим



Напряжения в швах от действия силы *F*определяют по формуле 

Обозначив это напряжение τF получим суммарное максимальное напряжение:

τ= τT + τF ≤ [τ’].

Оценивая нахлесточные соединения, отметим, что по форме и расходу материала они уступают стыковым соединениям, но не требуют обработки кромок.

Если в нахлесточном соединении угловые швы не обеспечивают требуемой прочности, то дополнительно к угловым применяют пробочные (рис. 19.11, *а*), прорезные (рис. 19.11,*б*), и проплавленные швы (рис.19.11, *в*).

Пробочный шов получается путем заполнения расплавленным металлом отверстий круглой формы в одной или обеих соединяемых деталях. Прорези прорезных швов могут быть закрытыми или открытыми. Из-за высокой трудоёмкости изготовления, низкой прочности и негерметичности – это один из худших видов соединений. Проплавленные швы – более производительны.

**

***а)                                            б)                                         в)***

**Рис.19.11**

### *Расчет сварных соединений контактной сварки*

Стыковая контактная сварка при соблюдении установленных правил технологии обеспечивает равнопрочность соединения и деталей, поэтому можно не выполнять специальных расчетов прочности соединения при статических нагрузках. Это справедливо только в том случае, если разогрев металла в зоне сварки не влечет за собой снижения его прочности (например, низкоуглеродистые и низколегированные cтали, не подвергающиеся термообработке). В противном случае допускаемое напряжение при расчете деталей в месте стыка снижают с учетом уменьшения прочности материала в зоне термического влияния. При переменных нагрузках допускаемые напряжения понижают по сравнению со статическими, так же как и для стыковых соединений дуговой сваркой.

### *Расчет сварных соединений точечной сварки*

Точечная сварка (рис.19.12) выполняется по ГОСТ 15878-79 «Контактная сварка. Соединения сварные».

Применяют для соединения деталей из тонкого листового материала при соотношении толщин .



**Рис.19.12**

Диаметр сварной точки выбирают в зависимости от толщины меньшей из свариваемых деталей:

d=1,2∙δmin+4 мм при  δmin≤3,

d=1,5∙δmin+5 мм при δmin>3.

Минимальный шаг*t*ограничивается явлением шунтирования тока ранее сваренной точкой. Расстояние от кромок *t*1 – по торцу  и *t*2– по длине нормируют с учетом технологических и силовых факторов. Обычно принимают

*t*= 3*d*;    *t*1 = 2*d*;    *t*2 = 1,5*d*.

Соединения точечной сваркой работают преимущественно на срез. При расчете полагают, что нагрузка распределяется равномерно по всем точкам. Неточность расчета компенсируют уменьшением допускаемых напряжений:



где z – число сварных точек;  *i =*1÷2 – число плоскостей среза. Для конструкции по рис. 19.12,*a*  *z* = 4, *i*=l; по рис. 19.12,*б*  *z* = 2, *i*= 2.

При нагружении точечных сварных соединений моментом в плоскости стыка деталей расчетную точку и ее нагрузку определяют так же, как и для заклепочных соединений или соединений с болтами, поставленными без зазора.

Точечному соединению свойственна высокая концентрация напряжений. Поэтому оно сравнительно плохо работает при переменных нагрузках. Концентрация напряжений образуется не только в сварных точках, но и в самих деталях в зоне шва.

Точечные сварные соединения чаще применяют не как рабочие, воспринимающие основную нагрузку, а как связующие (например, крепление обшивки к каркасу).

***Шовная сварка*** (рис. 19.13).

Напряжения среза



Концентрация напряжений в швах меньше, чем при точечной сварке, соединение герметичное.



**Рис.19.13**

### *Расчет сварных тавровых швов*

Соединяемые детали в зоне сварных швов перпендикулярны (наиболее частый случай) или наклонны друг к другу. Это соединение выполняют стыковым швом с разделкой кромок (рис. 20,*а*) или угловыми швами без разделки кромок (рис. 20,*б*).



**Рис. 20**

При нагружении изгибающим моментом и силой прочность соединения определяют по формулам:

для стыкового шва



для угловых швов



При выводе формулы (5) учтено, что напряжения τam от момента распределяются по длине шва аналогично напряжениям σnam в поперечном сечении балки. За расчетное сечение по-прежнему принято сечение по биссектрисе m – m.

На рис. 21 показано тавровое соединение трубы, нагруженное изгибающим и крутящим моментами.

Напряжения в шве от крутящего момента



В уравнении (6) принято, что катет *k* шва мал в сравнении с*d*. При этом можно считать, что напряжения τT распределены равномерно по кольцевой площадке разрушения шва, равной βkπdcp, а средний диаметр этой площадки

dcp= d + βk ≈ d.

Напряжения в шве от изгибающего момента



Здесь учтено, что для такого сечения *W* в два раза меньше *W*ρ.

Напряжения τT и τM в сечении m – m (рис. 21) взаимно перпендикулярны. Поэтому суммарное напряжение





**Рис. 21**

В любом случае для расчёта самых сложных сварных швов сначала необходимо привести силу и момент к шву и распределить  их пропорционально несущей способности (длине) всех простых участков. Таким образом, любой сложный шов сводится к сумме простейших расчётных схем.

Существует множество других нагружений силами, изгибающими и крутящими моментами. Для каждого из случаев составляется свое условие прочности, которые здесь охватить невозможно.

### *Сварные  соединения  при  переменных нагрузках*

Размеры швов выбирают из условия равнопрочности основного металла и шва при статическом нагружении. Однако при действии переменных нагрузок (обозначим их *F*− var) прочность сварных соединений снижается.

Эффективными средствами повышения прочности сварных соединений при *F*– var являются:

1) наклеп поверхности дробью, ультразвуковым ударом специальных головок, чеканка;

2) предварительная подготовка кромок шва (например, в тавровых соединениях со скосами кромок прочность в 1,5 раза выше, чем без разделки кромок);

3) выполнение лобовых швов с отношением катетов 1:3 с плавной формой перехода к основному металлу;

4) отжиг швов для снятия остаточных напряжений и др.

**Расчет на сопротивление усталости при *F*- var** проводят путем определения коэффициента безопасности *S*σ (или *S*τ) в околошовной зоне основного металла и сравнения его с допускаемым [*S*σ] (или [*S*τ]):

*S*σ= σ*RKN*/σmax ≥ [*S*σ],                                                     (7)

где σ*R*− предел выносливости сварного соединения при асимметричном цикле нагружения с коэффициентом асимметрии  *R=F*min*/F*max;

*KN*– коэффициент долговечности;  *KN* = (*NG* / *N*)1/*m* ≥1,

где *N*− заданное число циклов нагружения;

*m* = 12/*K*σ − показатель степени в уравнении кривой усталости;

σmax = (σ*m* + σ*a*) – максимальное напряжение цикла:

σ*m*= σmax (1 + *R*) / 2 − среднее напряжение,

σ*a*= σmax (1 – *R*) / 2 − амплитуда напряжений;

[*S*σ] = 1,4…2,5 – для машиностроительных конструкций.

То же в формуле (7) и для напряжений τ с заменой символов σ на τ.

Для сварных деталей предел выносливости σ*R* − максимальное по модулю напряжение цикла, при котором еще не происходит усталостного разрушения до базового числа циклов *NG*  = 2,7∙106.

Из диаграммы предельных напряжений («Сопротивление материалов»)

σ*R* = 2σ-1св/[1 + ψσ – *R* (1 – ψσ)],                                (8)

где ψσ - коэффициент чувствительности сварного соединения к асимметрии цикла: ψσ = 0,2 при *K*σ < 2; ψσ = 0,05 при *K*σ ≥2, где *K*σ  - эффективный коэффициент концентрации напряжений (отношение предела выносливости целого образца к пределу выносливости сварного):

1) для стыковых соединений *K*σ  = 1,2…1,6 (меньшие значения при автоматической сварке, большие при ручной);

2) для угловых швов нахлесточных соединений:

а) лобовой шов *K*σ = 1,6…3,2;

б) фланговый шов *K*σ= 3,4…4,4;

3) для тавровых соединений *K*σ = 2,5…4;

4) для контактной сварки:

а) точечной *K*σ = 7,5…12;

б) шовной *K*σ = 5…7,5.

Предел выносливости сварных деталей

σ-1св = σ-1 / *K*св,                                                              (9)

где σ-1- предел выносливости основного металла при симметричном цикле. Для стали ориентировочно можно принять σ-1 = 0,43σВ;

      *K*св  - коэффициент снижения σ-1 с учетом основных факторов, влияющих на усталость сварного соединения.

В настоящее время наибольший опыт расчетов и нормативов имеется в локомотиво- и краностроении. По их данным

*K*св  = *K*σ∙*K*1∙*K*2/(*Kd∙KF*),                                                (10)

где *K*1 - коэффициент, учитывающий влияние неоднородности металла свариваемых деталей:

- для проката, поковок, штамповок *К*1 = 1,1;

- для литья *К*1= 1,2…1,3;

*К*2 - коэффициент, учитывающий влияние габаритных размеров деталей:

− при размерах до 250 мм   *K*2= 1;

− при размерах 250…1000 мм   *K*2= 1,0…1,2;

*Кd* - коэффициент, учитывающий влияние длины *l* сварного шва: для фланговых швов нахлесточного соединения при *l*= 40…200 мм *Кd* = 0,91…0,59;  для других швов *Кd* = 1;

*КF* - коэффициент, учитывающий качество поверхности  сварного соединения:

- для стальных литых деталей после пескоструйной обработки *КF* = 0,8

- после грубой механической обработки *КF*  = 0,8…0,85;

- после чистовой обработки *КF*  = 0,9.

## *Наибольшую прочность при*F*- var имеют стыковые соединения.*

Одним из основных факторов, влияющих на ударную выносливость соединения, является очертание шва (плавность перехода к основному металлу). Наиболее действенными способами повышения ударной выносливости является заглаживание швов и мест перехода к основному металлу, а также поверхностный наклеп дробью или плавно молотками. Но при малом количестве циклов эффект применения наклепа уменьшается, наклеп снижает пластичность, что нежелательно для конструкций, работающих при низких температурах, предложен метод аргонодугового оплавления.

##

### *Расчет клеесварных соединений*

Клеесварные соединения представляют собой точечно-сварные соединения, у которых в промежутках между точками сварки находится клей, нанесенный до сварки (сварка по клеевой пленке) или введенной после сварки.

Прочность клеесварного соединения зависит от площади нахлестки и равна сумме прочности точки и прочности клея из расчета τ*кл*.= 50 кгссм2  для клеев ФЛ-4С, МПФ-1, 13К-32-ЭМ.

Такая заниженная прочность клея объясняется тем, что расстояние между листами является непостоянным, меняясь от максимума на наибольшем удалении от точки до минимума вблизи точки и до нуля в месте сварки. Указанная величина τ*кл*. является осредненной, отнесенной ко всей площади нахлестки.

Прочность клеесварного соединения на произвольной длине определяется силой



или прочная сила, которую способно воспринимать клеесварное соединение:



где   *Р1*– прочность одной точки сварки на срез, кгс;

*t* – шаг точек, см;

         *b* – ширина нахлестки, см;

        τ*кл* – прочность клея на срез, кгссм2.

Прочность сечений вне клеевого шва на длине Z определяется силой

Ро= qoZ

где *qo* – прогонная нагрузка, которую способно воспринимать сечение вне шва.

При работе на растяжение

qo=σδ

где δ– толщина детали в месте соединения;

σ – напряжение растяжения (или сжатия) материала детали.

При работе на сдвиг

qo= τδ

где τ – напряжение сдвига материала детали.

Относительная прочность клеесварного соединения



Откуда



Из полученного выражения можно найти зависимость  которая для материала Д16-Е при σ= 4000 кгссм2   τ= 2500 кгссм2, *t* = 2 см, δ = 0,2 см и τ*кл* = 50 кгссм2 равна:

при растяжении



при сдвиге



В клеесварных конструкциях силовую основу составляют сварные точки, разгруженные в значительной мере клеевой прослойкой. Кроме того, клеевая прослойка выполняет роль герметизирующего элемента, позволяя тем самым осуществлять антикоррозионную защиту клеесварных соединений методом анодного оксидирования, в отличие от сварных конструкций, не допускающих электрохимических способов защиты из-за попадания агрессивных электролитов в зазоры нахлесточных соединений.

В целом прочность клеесварных соединений при толщине листов 1-1,5 мм на 50% выше прочности сварных и клепанных, а при толщине 3-4 мм на 15…25% выше сварных.

### *Порядок расчета сварных соединений*

1. При **проектном расчете** наиболее целесообразен такой порядок расчета:

1.1. Разработка конструкции соединения (взаимное наложение деталей, размеры деталей, связанных непосредственно со сваркой, назначение вида обработки кромок, выбор вида соединения).

1.2. Выбор вида сварного шва.

1.3. Назначается материал деталей, электроды, и определяются допускаемые напряжения.

1.4. Записывается условие прочности шва. В условии прочности две неизвестных величины: катет шва и длина сварного шва. Можно, задавшись толщиной шва или катетом шва, определить требуемую длину шва из условий прочности. Такой путь, — как правило, громоздкий, и его применяют когда решение простое, например, — когда соединение  нагружено одним силовым фактором.

2. При **проверочном расчете** целесообразен порядок расчета путем последовательных приближений.

2.1. Разрабатывают конструкцию соединения (взаимное наложение деталей, размеры деталей, связанных непосредственно со сваркой, назначение вида обработки кромок, выбор вида соединения).

2.2. Выбирают тип сварного шва и его основные параметры: толщина, катет шва и длина шва (обычно из соображений конструктивных).

2.3. Выбирают материал деталей, электроды, и определяют допускаемые напряжения.

2.4. Записывают условие прочности шва, определяют величину максимальных напряжений в шве и сравнивают с допускаемыми.

2.5. Если напряжения в шве отличаются от   допускаемых напряжений менее чем на 3% в большую сторону (перегрузка) или менее чем на 15% в меньшую сторону (недогрузка), то расчёт считается законченным, т.к. условия прочности соблюдены.

2.6. При значительной (более 3%) перегрузке следует увеличить размеры шва и вести расчет до выполнения пункта 2.5.

2.7. При значительной (более 15%) недогрузке следует уменьшить размеры шва и вести расчет до выполнения пункта 2.5.

**Пути  удовлетворения условий прочности:**

а) путем изменения толщины или катета шва в рекомендуемых пределах,

б) путем изменения длины шва, что может вести к изменению конструкции всего соединения,

в) путем изменения конструкций швов (применение прорезных, проплавных швов),

г) изменение технологии сварки,

д) изменение материала конструкции.

### *Рекомендации по конструированию сварных соединений встык и внахлест*

Из-за дефектов сварки на концах шва принимают минимальную длину шва не менее 30 мм.

В соединениях внахлест (рис.9, *а*) длину перекрытия принимают больше 4*s*, где *s*– минимальная толщина свариваемых деталей. Длина лобовых швов *lш*не ограничивается. Длина фланговых швов ограничивается, так как с увеличением их длины возрастает неравномерность распределения напряжений по длине шва (рис.9, *б*) *lфл < 60K*



**Рис.22**

Сварные швы располагают так, чтобы они в соединении были нагружены равномерно. При проектировании соединения уголков с косынками (рис.22) длины фланговых швов принимают обратно пропорциональными расстояниям до центра тяжести уголка:



Суммарная длина фланговых швов



Следовательно, длина флангового шва у примыкающей полки уголка



В конструкциях, подверженных действию вибрационных знакопеременных нагрузок, соединения внахлест не рекомендуются, так как они создают значительную концентрацию напряжений.

### *Условные изображения и обозначения сварных швов*

**Условные изображения** и обозначения на чертежах швов сварных соединений устанавливает ГОСТ 2.312-72.

Сварной шовнезависимо от способа сварки изображают на чертеже соединения следующим образом:

**- видимый шов** – сплошной основной линией (рис. 23);

**- невидимый шов** – штриховой линией (рис. 24);

- при точечной сварке **видимую одиночную сварную точку** – знаком +, который выполняют основными сплошными линиями (рис. 25);

- при точечной сварке **невидимые одиночные сварные точки** не изображают.



**Рис.23**



**Рис.24                         Рис.25                        Рис.26                       Рис.27**

На изображении сварного шва различают **лицевую и оборотную стороны**.

За лицевую сторону одностороннего швапринимают ту сторону, с которой проводится сварка. Лицевой стороной двустороннего шва с несимметричной подготовкой (скосом) кромок будет та сторона, с которой проводят сварку основного шва (см. рис. 23,б). Если же подготовка симметрична, то за лицевую сторону принимают любую сторону (см. рис. 23,в).

На изображении сечения **многопроходного шва** допускается выносить контуры отдельных проходов; при этом необходимо обозначать проходы прописными буквами русского алфавита (рис. 26).

Шов, размеры конструктивных элементов которого стандартами не установлены (**нестандартный шов**), изображают с указанием размеров конструктивных элементов, необходимых для выполнения шва по данному чертежу (рис. 27).

**Границы шва** изображают сплошными основными линиями, а конструктивные элементы кромок в границах шва – сплошными тонкими линиями.

На чертежах сварного соединения каждый шов имеет определенное **условное обозначение,** которое наносят:

- для шва с лицевой стороны  - на полке линии-выноски, заканчивающейся односторонней стрелкой, проведенной от изображения шва;

- для шва с оборотной стороны – под полкой линии-выноски, заканчивающейся односторонней стрелкой, проведенной от изображения шва.

**Буквенно – цифровое обозначение шва:**

Стыковой С1 – С25.

Тавровый Т1 – Т11.

Внахлестку Н1 – Н10.

**Некоторые примеры цифровых обозначений наиболее применяемых швов.**

Для стыковых соединений:

а) С4 -  односторонний шов, без скоса кромок, на съёмной подкладке, для деталей толщиной 1…4 мм.

б) С2 – односторонний шов без скоса кромок деталей толщиной 1…4 мм.

в) С5 – односторонний шов, без скоса кромок, на остающейся подкладке, для деталей толщиной 1…4 мм.

г) С6 - односторонний замковый шов, для деталей толщиной 1…4 мм.

д) С8 -  односторонний, со скосом одной кромки, для деталей толщиной 3…60 мм.

Для тавровых соединений:

а) Т1 — односторонний шов, без скоса кромок, для деталей толщиной 2…40 мм.

б) Т2 — двусторонний, с криволинейным скосом одной кромки, для деталей толщиной 15…100 мм.

в) Т7 — двусторонний, со скосом одной кромки, для деталей толщиной 3…60 мм.

г) Т3 — двусторонний без скоса кромок с толщиной деталей 2…40 мм.

д) Т5 — двусторонний, с двумя симметричными криволинейными скосами кромок, для деталей толщиной 30…120 мм.

е) Т6 — односторонний, со скосом одной кромки, для деталей толщиной 3…60 мм.

Для нахлёсточных соединений.

а) H1 — односторонний шов, без скоса кромок, для деталей толщиной 2…60 мм.

б) Н2 – двуосторонний шов, без скоса кромок, для деталей толщиной 2…60 мм.

**Структура условного обозначения** стандартного шва или одиночной сварной точки включает:

1. Обозначение стандарта на типы и конструктивные элементы швов сварных соединений (см. таблицу 6).

2. Буквенно-цифровое обозначение шва по стандарту на типы и конструктивные элементы швов сварных соединений.

3. Условное обозначение способа сварки по стандарту на типы и конструктивные элементы швов сварных соединений (допускается не указывать).

4. Знак и размер катета по стандарту на типы и конструктивные элементы швов сварных соединений.

5. Для прерывистого шва - длину провариваемого участка, обозначение знака № 4 для цепного шва или № 5 для шахматного шва (см. таблицу 6) и шаг.

    Для одиночной сварной точки - расчетный диаметр точки.

    Для шва контактной точечной сварки или электрозаклепочного - расчетный диаметр точки или электрозаклепки, обозначение знака № 4 или № 5 (см. таблицу 6) и шаг.

    Для шва контактной роликовой сварки - расчетную ширину шва.

    Для прерывистого шва контактной роликовой сварки - расчетную ширину, знак умножения, длину провариваемого участка, обозначение знака 4 и шаг.

6. Обозначение вспомогательных знаков 7, 2 и 1 (таблица 6).

7. Обозначение вспомогательных знаков 6 и 3 (таблица 6).

**Таблица 6.** Вспомогательные знаки для обозначения сварных швов

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Вспомогательный знак | Значение вспомогательного знака | Расположение вспомогательного знака относительно полкилинии-выноски, проведенной от изображения шва |
| Номер | Обозначение | с лицевой стороны | с оборотной стороны |
| 1 | image371 | Усиление шва снять | http://www.detalmach.ru/lect1.files/image182.gif | http://www.detalmach.ru/lect1.files/image183.gif |
| 2 | http://www.detalmach.ru/lect1.files/image184.gif | Наплывы и неровности шва обработать с плавнымпереходом к основному металлу | image121 | image121 |
| 3 | http://www.detalmach.ru/lect1.files/image188.gif | Шов выполнить при монтаже изделия, то есть при установкеего по монтажному чертежу на месте применения | image132 |
| 4 | image337 | Шов прерывистый или точечный с цепным расположением.Угол наклона линии 60° | image086 | http://www.detalmach.ru/lect1.files/image192.gif |
| 5 | image137 | Шов прерывистый или точечный с шахматнымрасположением | http://www.detalmach.ru/lect1.files/image194.gif | image089 |
| 6 | http://www.detalmach.ru/lect1.files/image196.gif | Шов по замкнутой линии.Диаметр знака 3-5 мм | http://www.detalmach.ru/lect1.files/image197.gif |
| 7 | http://www.detalmach.ru/lect1.files/image198.gif | Шов по незамкнутой линии.Знак применяют, если расположение шва ясно из чертежа | http://www.detalmach.ru/lect1.files/image199.gif | http://www.detalmach.ru/lect1.files/image200.gif |

После вспомогательных знаков, если указана последующая механическая обработка шва, ставят обозначение шероховатости поверхности обработанного шва (см. рис. 23,а).

Вспомогательные знаки (см. таблицу 6) выполняют тонкими сплошными линиями, они должны быть одинаковой высоты с цифрами, входящими в обозначение шва.

Условное обозначение стандартного шва, показанное на полке линии-выноски (см. рис. 28), расшифровывается так: *шов нахлесточного соединения (буква Н), прерывистый шов по незамкнутой линии (знак 7); катет сечения шва 6 мм; длина каждого проваренного участка 100 мм, шаг 200 мм (100/200).*



**Рис.28**

Сварочные материалы указывают на чертеже в технических требованиях или таблице швов.

Допускается сварочные материалы не указывать.

При наличии на чертеже одинаковых швов обозначение наносят у одного из изображений, а от изображений остальных одинаковых швов проводят линии-выноски с полками.

Всем одинаковым швам присваивают один порядковый номер, который наносят:

- на линии-выноске, имеющей полку с нанесенным обозначением шва;

- на полке линии-выноски, проведенной от изображения шва, не имеющего обозначения, с лицевой стороны.

### *Написание технических требований на чертежах сварных конструкций*

В технических требованиях на чертежах сварных конструкций рекомендуется приводить следующие данные:

1) марку электродов или присадочной проволоки.

Вместо марки допускается указывать тип электрода по соответствующим государственным стандартам. Допускается вместо марок и типов электродов и марок присадочных проволок указывать необходимые требования к прочности и другим свойствам швов или сварных соединений;

2) сведения о необходимости термической обработки сварной конструкции после сварки;

3) сведения о необходимости, ограничении или запрещении правки;

4) контролируемые швы или участки швов и необходимость их контроля;

5) группу сварных соединений;

6) конструктивные и технологические нормы подготовки и сборки кромок под сварку и контролируемые размеры швов. Они должны соответствовать требованиям нормативно-технических документов.

Ниже приведены примеры записи **технических требований** на чертежах сварных конструкций.

Для углеродистых сталей обыкновенного качества (ГОСТ 380-88), сталей углеродистых качественных конструкционных (ГОСТ 1050-88):

*1. Сварку проводить электродом Э42А (ГОСТ 9467-75).*

*Сварные швы по ГОСТ 5264-80.*

*2. Сварные швы группы ... (отраслевой стандарт).*

Если на чертеже имеются стандартные и нестандартные швы, то в технических требованиях пишут:

*1. Сварку проводить электродом Э42А (ГОСТ 9467-75).*

*Сварные швы №№ ...по ГОСТ 5264-80.*

*Сварка швов № ... - ручная дуговая.*

*2. Сварные швы группы ... (отраслевой стандарт).*

Допускается на чертеже сварные швы не обозначать, особенно для пространственных конструкций из уголков, швеллеров и т.д.

Например:

*... В местах стыка деталей из швеллеров сварка швами Т3 катетом не менее 5 мм и С2 по ГОСТ 5264-80 по всей длине соприкосновения деталей.*

*...В местах стыка деталей из листов сварка швом С2 длиной 50 мм и шагом 200 мм, приварка деталей из листов к швеллерам и фланцам швом HI катетом не менее 5 мм длиной 50 мм с шагом 200 мм по ГОСТ 5264-80.*

*...В местах стыка деталей из труб сварка швом У5 катетом не менее 5 мм по ГОСТ 16037-80 по всей длине соприкосновения деталей.*

*...В местах стыка деталей из труб со швеллерами сварка швом Т1 катетом не менее 5 мм по ГОСТ 5264-80.*

*... В местах  стыка деталей  из труб с лентой сварка швом HI  no ГОСТ 5264-80.*

Для легированных конструкционных сталей (ГОСТ 4543-71):

*1. Сварку проводить электродом Э85А (ГОСТ9467-75).*

*2. Сварные швы по ГОСТ 5264-80.*

*3. Сварные швы группы ... (отраслевой стандарт).*

Для коррозионно-стойких сталей по ГОСТ 5632-72 (*сталь 12Х18Н10Т*):

*1. Сварные швы по ГОСТ 14771-76.*

*2. Сварку   проводить   с   присадочной  проволокой   Св06Х19Н9Т ГОСТ 2246-70.*

*3. Допускается замена на проволоку Св04Х19Н11МЗ ГОСТ 2246- 70.*

*4. Допускается  сварка электродуговая.   Электрод Э-08Х17Н8М2 ГОСТ 10052-75.*

*5. Сварные швы группы ... (отраслевой стандарт).*

Если в сварной конструкции применяются различные способы сварки, то в технических требованиях следует делать запись по типу:

*1. Сварка электродуговая электрод Э-08Х20Н9Г2Б (ГОСТ 10052-75). Допускается электрод Э-08Х17Н8М2 (ГОСТ 10052-75).*

*1. Сварные швы группы ... (отраслевой стандарт).*

*3. Сварные швы, выполненные электродуговой сваркой, контролировать радиографическим методом по ГОСТ 7512-82.*

*4. Остальные сварные швы выполнить аргонодуговой сваркой с присадочной проволокой Св06Х19Н9Т (ГОСТ 2246-70).*

*5. Сварные швы, выполненные точечной сваркой, группы ... (отраслевой стандарт).*

Если на сборке выполняются сварные швы из алюминиевых сплавов различных марок:

*Сварные швы по ГОСТ 14806-80, кроме шва №1.*

*Сварку швов №7 - №5 проводить с присадочной проволокой СвАМц (ГОСТ 7871-75).*

*Сварка шва №1 - с присадочной проволокой СвАМгб (ГОСТ 7871-75).*

*Сварные швы группы ... (отраслевой стандарт).*

Для титановых сплавов (ГОСТ 19807-91) (*ОТ4, ВТ1-00*):

*1. Сварка аргонодуговая.*

*Сварные швы группы ... (отраслевой стандарт).*

*2. Сварочная проволока СвОТ4 ОСТ1.90015-77.*

*Допускается сварка без присадочной проволоки.*

*3. Сварные швы контролировать радиографическим методом по ГОСТ 7512-82.*

*4. После сварки выполнить правку и отжиг по инструкции ...*

*Ударная правка и правка с применением статических нагрузок не допускается.*

Для материала ВТ14, если требуется равнопрочность сварного шва с основным материалом, то в технических требованиях пишут:

*Сварочная проволока СвСПТ-2 ОСТ- 1.90015-77.*

Без предъявления требований равнопрочности к сварному шву:

*Сварочная проволока CвBT1-00 ОСТ - 1.90015-77.*