

**Министерство образования и науки  
Российской Федерации  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ**

**А.Б. КОНОВАЛОВ, А.Л. КИРИЛЕНКО, М.В. АВБАКУМОВ**

## **СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ**

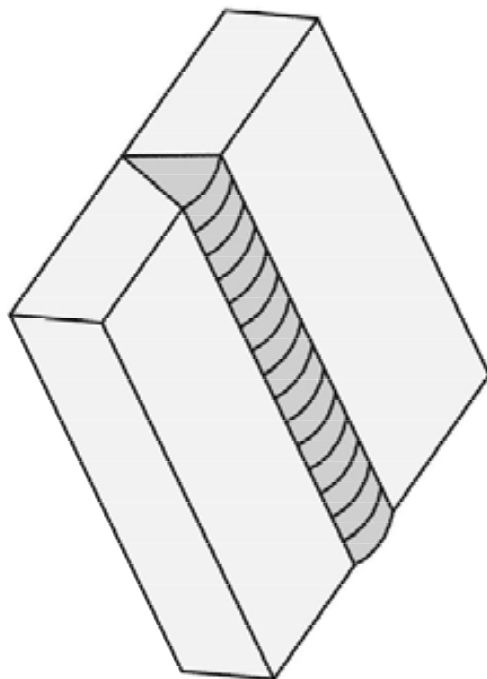
**Учебное пособие**

**Санкт-Петербург  
2010**

**А.Б. КОНОВАЛОВ, А.Л. КИРИЛЕНКО,  
М.В. АВВАКУМОВ**

# **СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ**

**Учебное пособие**



**Санкт-Петербург  
2010**

Учебное издание

Александр Борисович Коновалов  
Александр Львович Кириленко  
Михаил Викторович Аввакумов

## **СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ**

Учебное пособие  
для студентов всех специальностей

Редактор и корректор Н.П. Новикова  
Техн. редактор Л.Я. Титова

Темплан 2010 г., поз. 127

---

Подп. к печати 02.12.2009. Формат 60×84/16. Бумага тип №1. Печать офсетная. Объем 4,0 уч.- изд. л., 4,0 усл.- печ. л. Тираж 100 экз. Изд. № 127.  
Цена «С». Заказ №

---

Ризограф ГОУВПО Санкт-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров, 198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.

ББК 34.441

К 647

УДК 621.79 (075)

Коновалов А.Б., Кириленко А.Л., Аввакумов М.В. Сварные соединения: учебное пособие / ГОУВПО СПбГТУРП. – СПб., 2010. – 97 с.: ил.74.

Приводятся общие сведения об основных способах сварки, применяемых в машиностроении, классификация сварных соединений и швов. Рассмотрены методики расчетов различных типов сварных соединений при постоянных и переменных нагрузках. Приведены примеры расчетов.

Учебное пособие предназначено для студентов всех специальностей и форм обучения при выполнении практических заданий по курсам «Детали машин и основы конструирования», «Прикладная механика», а также при изучении теоретических частей этих курсов.

Рецензенты:

Сергеевичев В.В. – заведующий кафедрой «Теории механизмов, деталей машин и подъемно-транспортных устройств» Санкт-Петербургской лесотехнической академии им. С.М.Кирова, профессор, доктор технических наук

Лепеш Г.В. – заведующий кафедрой «Сервиса торгового оборудования и бытовой техники» Санкт-Петербургского государственного университета сервиса и экономики», профессор, доктор технических наук

Подготовлено и рекомендовано к печати кафедрой «Основы конструирования машин и систем автоматизированного проектирования» ГОУВПО Санкт-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров (протокол № 2 от 18.09. 2010 г.).

Утверждено к изданию методической комиссией факультета механики автоматизированных производств ГОУВПО СПбГТУРП (протокол № 1 от 22.09.2010 г.).

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом в качестве учебно-методического пособия.

© Коновалов А.Б., Кириленко А.Л.,  
Аввакумов М.В., 2010

© ГОУВПО Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров, 2010

## ВВЕДЕНИЕ

В машиностроении при изготовлении машин и механизмов широко применяются различные виды соединений. Различают разъёмные и неразъёмные соединения. Основным видом неразъёмных соединений в настоящее время являются сварные соединения. Это обусловлено низкой стоимостью сварных соединений, высокой производительностью процесса сварки, возможностью автоматизации технологического процесса. Современные технологии автоматизации сварочного производства позволяют применять автоматические процессы сварки не только в серийном, но и в единичном и мелкосерийном производстве. Во многих случаях сварка является единственным возможным или наиболее эффективным способом создания неразъёмных соединений конструкционных материалов и получения ресурсосберегающих заготовок, максимально приближенных по геометрии к оптимальной форме готовой детали или конструкции. Несмотря на то, что основным конструкционным материалом в сварных конструкциях и изделиях остается сталь, непрерывно увеличивается применение легких сплавов, полимерных материалов и композитов. Сварные соединения обладают не только прочностью, но и водо- и газонепроницаемостью, что особенно важно для листовых конструкций. Многие конструкции современных машин и сооружений невозможно изготовить без помощи сварки, например, космические аппараты, подводные лодки, газо- и нефтепроводы. Сварные соединения широко используются также при создании различных сооружений, например, в строительстве. Более 50 % валового национального продукта промышленно развитых стран создается с помощью сварки и родственных технологий; до 2/3 мирового потребления стального проката идет на производство сварных конструкций и сооружений.

В связи с широким распространением сварных соединений специалисты, занимающиеся проектированием, изготовлением, эксплуатацией и ремонтом машин и оборудования, должны знать основы сварочных процессов, суть и особенности основных видов сварки, методы расчета сварных соединений. При подготовке бакалавров по направлению «Технологические машины и оборудование» эти вопросы изучаются в курсах «Детали машин и основы конструирования» и «Основы технологии машиностроения».

В предлагаемом пособии рассмотрены основные виды сварки и сварных соединений, изложены методики расчета различных сварных соединений и приведены примеры их расчета. Пособие может быть использовано при изучении курса «Детали машин и основы конструирования».

## 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Сварка – технологический процесс получения неразъемных соединений материалов посредством установления межатомных связей между свариваемыми частями при их местном или пластическом деформировании или совместным действием того и другого. Сваркой соединяют однородные и разнородные металлы и их сплавы, металлы с некоторыми неметаллическими материалами (керамикой, графитом, стеклом и др.), а также пластмассы.

Сварка по сравнению с другими способами соединения обеспечивает следующие преимущества:

1. Экономия металла вследствие: полного использования рабочих сечений элементов в соединительных узлах сварных конструкций; придания конструкциям более целесообразной формы в соответствии с действующими нагрузками; резкого уменьшения веса соединительных элементов в сварных узлах; применения более тонкостенных конструкций; отсутствия расхода металла на литники и прибыли; уменьшения брака и припусков на механическую обработку при замене литья сваркой. В сварных конструкциях вес металла сварных швов обычно составляет от 1 до 2 %, в то время как в клепаных вес заклепок и косынок — не менее 4 % от веса изделия. Сварка дает до 25 % экономии металла по сравнению с клепкой, по сравнению с литьем экономия металла достигает: при замене стального литья сваркой до 25–30 %, при замене чугуна литья сваркой стального проката – до 50–60 %.

2. Сокращение сроков работ и уменьшение стоимости изготовления конструкций за счет снижения расхода металла и уменьшения трудоемкости работ.

3. Возможность изготовления изделий сложной формы путем сварки их из отдельных штампованных или литых элементов вместоковки или отливки изделия в целом. Такие конструкции называются, соответственно, штампованными или сварно-литыми и широко применяются в автомобилестроении, авиастроении, вагоностроении и других областях. Применение таких конструкций дает экономию металла и трудозатрат. При изготовлении конструкций сложной формы использование сварки вместоковки и литья дает большой экономический эффект. Например, производительность труда при изготовлении сварных конструкций в 2 раза выше, чем литых и кузнечно-штампованных, а условия труда значительно лучше. Капитальные вложения на тонну сварных конструкций в 1,5–2 раза меньше, а себестоимость в 1,3–1,6 раза ниже, чем в литейном производстве. При снижении веса повышается надежность и долговечность изделий.

4. Удешевление технологического оборудования. Сварочное оборудование сравнительно несложно, относительно дешево и весьма высокопроизводительно.

5. Облегчение комплексной механизации массового производства однотипных сварных изделий, возможность создания поточного производства со 100 %-й механизацией и автоматизацией производственного цикла, что резко увеличивает съём продукции с единицы производственной площади производственного помещения.

6. Возможность широкого использования в сварных конструкциях прогрессивных современных видов материалов: высокопрочных сталей, гнутых облегченных профилей, многослойного листового проката, легких сплавов, сверхчистых металлов и др.

7. Возможность широкого использования сварки, наплавки и резки при ремонте, где эти способы обработки металла позволяют быстро и с наименьшими затратами восстанавливать изношенное, вышедшее из строя оборудование и разрушенные сооружения.

8. Герметичность и надежность сварных соединений.

9. Уменьшение производственного шума и улучшение условий труда в цехах.

К недостаткам сварных соединений относятся:

2. Нестабильное качество шва.
3. Трудность контроля.
4. Местные напряжения и коробление деталей.
5. Плохая виброустойчивость.

## **2. СУЩНОСТЬ ПРОЦЕССА СВАРКИ**

Физическая сущность процесса сварки заключается в образовании прочных связей между атомами и молекулами на соединяемых поверхностях заготовок. Для образования соединений необходимо выполнение следующих условий: освобождение свариваемых поверхностей от загрязнений, оксидов и адсорбированных на них инородных атомов; энергетическая активация поверхностных атомов, облегчающая их взаимодействие друг с другом; сближение свариваемых поверхностей на расстояния, сопоставимые с межатомным расстоянием в свариваемых заготовках.

Для осуществления сварки необходимо сблизить большое количество атомов поверхностей соединяемых металлов на очень малые расстояния, т.е. привести их в соприкосновение. Такому сближению препятствует высокая прочность и твердость металла: его атомы прочно удерживаются в узлах кристаллической решетки и малоподвижны. Твердость металла и жесткость кристаллической решетки можно ослабить нагревом. Чем выше температура нагрева, тем мягче металл и подвижнее его атомы. При нагреве до температуры плавления металл становится жидким, атомы в нем легко перемещаются, поэтому для сваривания достаточно расплавить немного металла у соединяемых

кромки. Жидкий металл обеих кромок сливается в общую сварочную ванну. Образование общей ванны вследствие подвижности атомов в жидком металле происходит самопроизвольно (спонтанно) и не требует приложения каких-либо усилий. По мере охлаждения расплавленный металл затвердевает и прочно соединяет свариваемые детали.

Известен и другой способ сварки, когда сильно сжатый металл течет подобно жидкости при обычной температуре. В этом состоянии металлы свариваются, срастаясь в монолитное целое, с полным исчезновением границы раздела. Взяв две детали, приведя их в соприкосновение и сдавив с такой силой, чтобы металл обеих деталей в стыке совместно деформировался и тек подобно жидкости, получим сварное соединение деталей. Это будет сварка давлением. Пластическое деформирование металла под давлением называется осадкой. Сварка давлением значительно облегчается и упрощается подогревом металла, поэтому в большинстве случаев сварка давлением используется с одновременным подогревом металла ниже точки его плавления.

Следовательно, различают сварку плавлением (металл нагревается до плавления, при этом осадка, как правило, не требуется) и многочисленными способами, в которых используется давление и производится осадка, для облегчения которой металл подогревается. На использовании этих двух основных факторов (нагрев металла и его осадка), которые применяются в различных комбинациях и соотношениях, основаны многочисленные способы сварки, используемые в современном производстве.

Современные способы сварки позволяют получать прочное соединение элементов металлической конструкции любой формы при толщине металла от 0,1 до 250 мм и даже больше. Однако далеко не все металлы свариваются одинаково хорошо.

При создании сварных соединений из металлических изделий главным требованием, предъявляемым к материалу соединяемых элементов, является свариваемость. Свариваемость – свойство металла или сочетания металлов образовывать при установленной технологии сварки соединение, отвечающее требованиям, обусловленным конструкцией и эксплуатацией изделия. Свариваемость является качественной характеристикой и для разных сталей не одинакова. Приблизительно свариваемость конструкционных углеродистых, легированных и низколегированных сталей определяется по эквиваленту углерода  $C_{\Sigma}$  по формуле

$$C_{\Sigma} = C + 0,05Mn + 0,067Ni + 0,1(Cr + Mo + V),$$

где  $C$  - содержание углерода, %;  $Mn$  - содержание марганца, %;  $Ni$  - содержание никеля, %;  $Cr$  - содержание хрома, %;  $Mo$  - содержание молибдена, %;  $V$  - содержание ванадия, %.

Стали подразделяют по свариваемости на четыре группы:



I. Стали с хорошей свариваемостью, при сварке которых высококачественное сварное соединение получается при обычных режимах всеми видами сварки без предварительного и сопутствующего подогрева ( $C_{Э} < 0,25$  %).

II. Стали с удовлетворительной свариваемостью – удовлетворительное по качеству сварное соединение можно получить только в узком диапазоне режимов с применением дополнительных технологических мероприятий, например, при предварительном подогреве конструкции ( $C_{Э} = (0,25–0,39)$  %).

III. Стали с ограниченной свариваемостью, при сварке которых удовлетворительное качество сварных соединений достигается в очень узком диапазоне режимов сварки с обязательным предварительным и сопутствующим подогревом при сварке и последующей после сварки термической обработкой ( $C_{Э} = (0,39–0,5)$  %).

IV. Стали с плохой свариваемостью, при сварке (или после сварки) которых образуются горячие или холодные трещины даже при применении специальных технологических мероприятий. Признаком плохой свариваемости считается также повышенная склонность металла к образованию закалочных структур в зоне сварки ( $C_{Э} > 0,5$  %).

При выборе марок сталей для сварных конструкций следует применять марки сталей, отнесенных к группам свариваемости I, II, III. Применение марок сталей группы IV следует ограничивать.

В табл. 1 приведена классификация некоторых марок стали по свариваемости.

Таблица 1

Классификация сталей по свариваемости

Группа свариваемости	Сталь	
	углеродистая	конструкционная легированная
Хорошая	Ст1, Ст2, Ст3, Ст4, сталь 08, 10, 15, 20, 25, 12кп, 16кп, 18кп, 20кп	15Г, 20Г, 15Х, 15ХА, 20Х, 15ХМ, 14ХГС, 10ХСНД, 10ХГСНД, 15ХСНД
Удовлетворительная	Ст5, сталь 30, 35	12ХН2, 12ХН3А, 14Х2МР, 10Г2МР, 20ХН3А, 20ХН, 20ХГСА, 30Х, 30ХМ
Ограниченная	Ст6, сталь 40, 45, 50	35Г, 40Г, 45Г, 40Г2, 35Х, 40Х, 45Х, 40ХН, 40ХМФА, 30ХГС, 30ХГСА, 35ХМ
Плохая	Сталь 65, 70, 75, 80, 85, У7, У8, У9, У10, У11, У12	50Г, 50Г2, 50Х, 50ХН, 45ХН3МФА, 6ХГС, 7Х3, 9ХС, 8Х3, 5ХНТ

В процессе сварки образуется сварной шов – участок сварного соединения, образовавшийся в результате кристаллизации расплавленного металла

сварочной ванны. Сварное соединение (рис. 1) включает три образующиеся в результате сварки характерные зоны металла в изделии: зону сварного шва 1, зону сплавления 2, зону термического влияния 3, а также часть основного металла 4, прилегающую к зоне термического влияния.

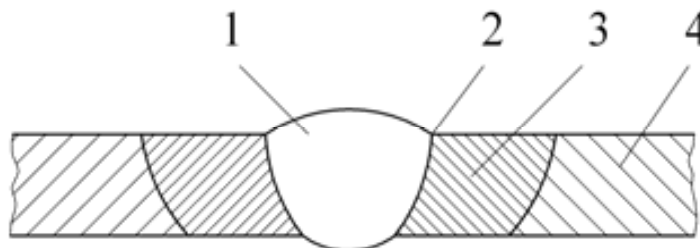


Рис. 1. Сварное соединение

Металл шва – сплав, образованный расплавленным основным и наплавленным металлами или только переплавленным основным металлом.

Основной металл – металл подвергающихся сварке соединяемых частей.

Зона сплавления – зона, где находятся частично оплавленные зерна металла на границе основного металла и металла шва. Эта зона нагрева ниже температуры плавления. Нерасплавленные зерна в этой зоне разъединяются жидкими прослойками, связанными с жидким металлом сварочной ванны, и в эти прослойки имеют возможность проникать элементы, введенные в ванну с дополнительным металлом или сварочными материалами. Поэтому химический состав этой зоны отличен от химического состава основного металла.

Зона термического влияния – участок основного металла, не подвергшийся расплавлению, структура и свойства которого изменились в результате нагрева при сварке, наплавке или резке.

Сварочная ванна – это часть металла сварного шва, находящаяся в момент сварки в расплавленном состоянии. Углубление, образующееся в шве по окончании сварки, называют кратером.

Металл, предназначенный для введения в сварочную ванну в дополнение к расплавленному основному, называют присадочным металлом.

Переплавленный присадочный металл, введенный в сварочную ванну или наплавленный на основной металл, называют наплавленным металлом.

### 3. КЛАССИФИКАЦИЯ СВАРКИ

Согласно ГОСТ 19521–74 сварка металлов классифицируется по физическим, техническим и технологическим признакам.

При классификации процессов сварки выделяют три основных физических признака: форму вводимой энергии, наличие давления и вид инструмента

— носителя энергии. В зависимости от вводимой в изделие энергии, сварочные процессы (сварка, пайка и резка) разделены на три класса:

термический – к этому классу относятся такие виды сварки, которые осуществляются плавлением с использованием тепловой энергии: дуговая, газовая, высокочастотная, термитная, электрошлаковая, плазменная, электронно-лучевая, лазерная;

термомеханический – виды сварки, которые осуществляются с использованием тепловой энергии и давления: контактная, диффузионная, газопрессовая;

механический – виды сварки, осуществляемые с использованием механической энергии и давления: ультразвуковая, трением, холодная.

К техническим признакам относятся способ защиты зоны сварки, непрерывность процесса и степень механизации сварки.

По способу защиты металла различают сварку в воздухе, вакууме, защитных газах, под флюсом, по флюсу, в пене и с комбинированной защитой. В качестве защитных могут быть применены активные газы (углекислый газ, азот, водород, водяной пар, смесь активных газов), инертные газы (аргон, гелий, смеси аргона с гелием), а также смесь инертных и активных газов.

По непрерывности процесса различают непрерывные и прерывистые виды сварки; по степени механизации – ручные, механизированные, автоматизированные и автоматические.

#### 4. ОСНОВНЫЕ СПОСОБЫ СВАРКИ

**Ручная дуговая сварка** – это сварка покрытым металлическим электродом. Является наиболее старой и универсальной технологией дуговой сварки.

Для образования и поддержания электрической дуги к электроду и свариваемому изделию (рис. 2) от источника питания подводится сварочный ток (переменный или постоянный).

Если положительный полюс источника питания (анод) присоединен к изделию, говорят, что ручная дуговая сварка производится на прямой полярности. Если на изделии отрицательный полюс, то полярность обратная. Под действием дуги расплавляются металлический стержень электрода (электродный металл), его покрытие и металл изделия (основной металл). Электродный металл в виде отдельных капель, покрытых шлаком, переходит в сварочную ванну, где смешивается с основным металлом, а расплавленный шлак всплывает на поверхность.

Размеры сварочной ванны зависят от режимов и пространственного положения сварки, скорости перемещения дуги по поверхности изделия, конструкции сварного соединения, формы и размера разделки свариваемых кромок и

т.д. Они обычно находятся в следующих пределах: глубина до 6 мм, ширина 8–15 мм, длина 10–30 мм.



Рис.2. Схема процесса ручной дуговой сварки

В результате плавления покрытия электрода вокруг дуги и над сварочной ванной образуется газовая атмосфера, оттесняющая воздух из зоны сварки для предотвращения его взаимодействия с расплавленным металлом. В газовой атмосфере также присутствуют пары легирующих элементов, основного и электродного металлов. Шлак, покрывая капли расплавленного электродного металла и поверхность сварочной ванны, препятствует их взаимодействию с воздухом, а также способствует очищению расплавленного металла от примесей.

По мере удаления дуги металл сварочной ванны кристаллизуется с образованием шва, соединяющего свариваемые детали. На поверхности шва образуется слой затвердевшего шлака.

Дуга зажигается кратковременным прикосновением конца электрода к свариваемому изделию. В результате протекания тока короткого замыкания и наличия контактного сопротивления торец электрода быстро нагревается до высокой температуры, при которой после отрыва электрода происходит ионизация газового промежутка и возникает сварочная дуга.

Электроды для ручной дуговой сварки (ГОСТ 9466–75) изготавливают из сварочной проволоки диаметром 1,6; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6; 8; 10 и 12 мм. При использовании в качестве электрода голой проволоки дуга горит неустойчиво из-за плохой проводимости тока между электродом и свариваемой деталью (мало ионов), шов получается низкого качества (выгорание углерода, легирующих добавок, окисление стали и т. п.). Для защиты зоны сварки от кисло-

рода воздуха и устойчивого горения дуги электроды имеют покрытие (обмазку) толщиной 3 – 5 мм. В ее состав входят:

- 1) ионообразующие вещества – молотый мел, поташ, мрамор. Сгорая в дуге, они образуют ионы и стабилизируют горение дуги;
- 2) раскислители и легирующие вещества – ферросилиций, ферромарганец, ферротитан, а также уголь – восполняют выгоревшие при сварке;
- 3) газообразующие – крахмал, древесные опилки. Сгорая в дуге, они оттесняют кислород и азот воздуха от сварочной ванны;
- 4) шлакообразующие – полевой шпат, расплавляясь и вспучиваясь, он образует над швом шлаковую корочку, которая замедляет остывание шва и снижает сварочные напряжения в нем.

Связующим материалом является жидкое стекло.

Вследствие малой длины электродов, сварку часто приходится прерывать и снова начинать, это снижает производительность и качество шва.

По назначению электроды подразделяют на ряд видов:

- для сварки конструкционных и теплоустойчивых сталей (ГОСТ 9467—75);
- для сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами (ГОСТ 10052—75);
- электроды для наплавки (ГОСТ 10051—75);
- электроды для сварки чугуна, цветных сплавов и т. д.

Некоторые основные типы электродов для ручной сварки, их назначение и механические свойства наплавленного металла (временное сопротивление разрыву  $\sigma_B$ , относительное удлинение  $\delta_S$  и ударная вязкость  $KCU$ ) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Основные типы электродов для ручной электродуговой сварки  
и сварочной проволоки

Тип электрода для ручной сварки	Механические свойства наплавленного металла после ручной сварки			Марка сварочной проволоки для сварки под флюсом или в защитных газах	Примерное назначение
	$\sigma_B$ , МПа	$\delta_S$ , %	$KCU$ , кДж/м <sup>2</sup>		
Э38	380	14	300	Св-08	Для сварки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей при $\sigma_B < 500$ МПа (БСтЗ, 20, 08 кп, 25Г и др.)
Э42	420	18	800	Св-08ГС	
Э46	460	18	800	Св-08Г2С	
Э50	500	16	700		

Тип электрода для ручной сварки	Механические свойства наплавленного металла после ручной сварки			Марка сварочной проволоки для сварки под флюсом или в защитных газах	Примерное назначение
	$\sigma_B$ , МПа	$\delta_s$ , %	$KCU$ , кДж/м <sup>2</sup>		
Э42А	420	22	1500	Св-08А	То же, но для ответственных конструкций предъявляются повышенные требования по пластичности и ударной вязкости (20Х, 14ХГС и др.)
Э46А	460	22	1400	Св-08ГА	
Э50А	500	20	1300	Св-08Г2С Св-10НМА	
Э55	550	20	1200	Св-08ГС	Для сварки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей с $\sigma_B = 500 \dots 600$ МПа (сталь 45, 35, 10Г2 и др.)
Э60	600	18	1000	Св-10ГН Св-12ГС	

Марки электродов для ручной сварки: Э42, Э46, Э50, Э60, Э70. Цифры в марке указывают предел прочности наплавленного металла на растяжение в килоньютонах на квадратный сантиметр (кН/см<sup>2</sup>). Литера А после цифр указывает на повышенное качество металла электродов, повышенную пластичность и ударную вязкость. Подбор марки электродов производится, исходя из условий равнопрочности соединяемой стали и наплавленного металла, а также с учетом группы конструкций и климатического района.

**Полуавтоматическая сварка** – дуговая сварка автоматически подающимся проволочным электродом (проволокой) в среде защитного газа (рис.3). Защитный газ, выходя из сопла, вытесняет воздух из зоны сварки. Сварочная проволока подается вниз роликами, которые вращаются двигателем подающего механизма. Подвод сварочного тока к проволоке осуществляется через скользящий контакт.

Химический состав стальной сварочной проволоки выбирают в зависимости от марки свариваемых сталей. Обычно сварочная проволока должна иметь меньшее содержание углерода и большее содержание легирующих элементов, чем свариваемые детали. В этом случае можно получить сварной шов равнопрочным с основным металлом и аналогичными физико-химическими свойствами. Проволока имеет буквенно-цифровое обозначение, включающее диаметр, ее назначение (сварочная, для электродов) и хи-

мический состав. Пример условного обозначения сварочной проволоки диаметром 3 мм, содержащей 0,04 % углерода, 20 % хрома и 9 % никеля: проволока 3Св–04Х20Н9 ГОСТ 2246—70. В конце марки через дефис может быть указано: О – омедненная проволока, Э — проволока для изготовления электродов.

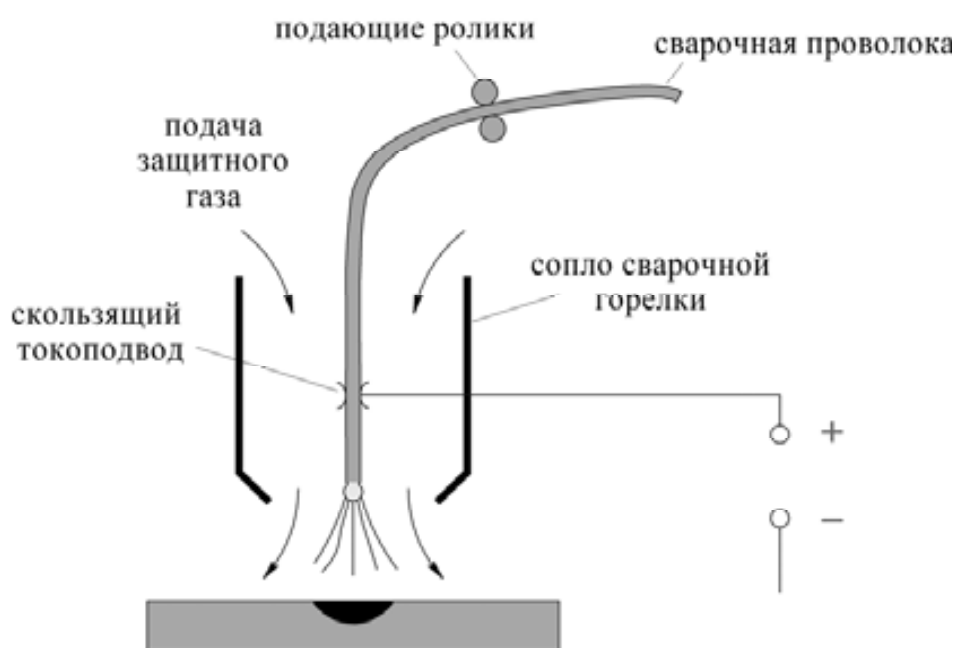


Рис. 3. Полуавтоматическая сварка

В качестве защитных газов наибольшее распространение получили углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ), аргон и смесь углекислого газа с аргоном.

Полуавтоматическая сварка в углекислом газе ( $\text{CO}_2$ ) является основной и наиболее распространенной технологией сварки плавлением на предприятиях машиностроительной отрасли. Она является экономичной, обеспечивает достаточно высокое качество сварных швов, особенно при сварке низкоуглеродистых сталей, возможна в различных пространственных положениях, требует более низкой квалификации сварщика, чем ручная дуговая сварка.

Углекислый газ обеспечивает защиту зоны сварки, но металл сварного шва получается недостаточно раскисленным, поэтому необходимо выбирать сварочную проволоку с повышенным содержанием марганца (Св–08Г2С, Св–08ХН2Г2СМЮ и др.).

**Аргонодуговая сварка** – дуговая сварка в среде инертного газа аргона. Аргон наиболее эффективен, но имеет высокую стоимость, его применяют в основном при сварке цветных сплавов и ответственных изделий из высоколегированных сталей. Может осуществляться плавящимся или непла-

вящимся электродом (рис.4). В качестве неплавящегося электрода обычно используется вольфрамовый электрод.

Аргон практически не вступает в химические взаимодействия с расплавленным металлом и другими газами в зоне горения дуги. Будучи на 38 % тяжелее воздуха, аргон вытесняет его из зоны сварки и надежно изолирует сварочную ванну от контакта с атмосферой.

Дуга горит между свариваемым изделием и неплавящимся электродом (обычно из вольфрама). Электрод расположен в горелке, через сопло которой вдувается защитный газ. Присадочный материал подается в зону дуги со стороны и в электрическую цепь не включен.

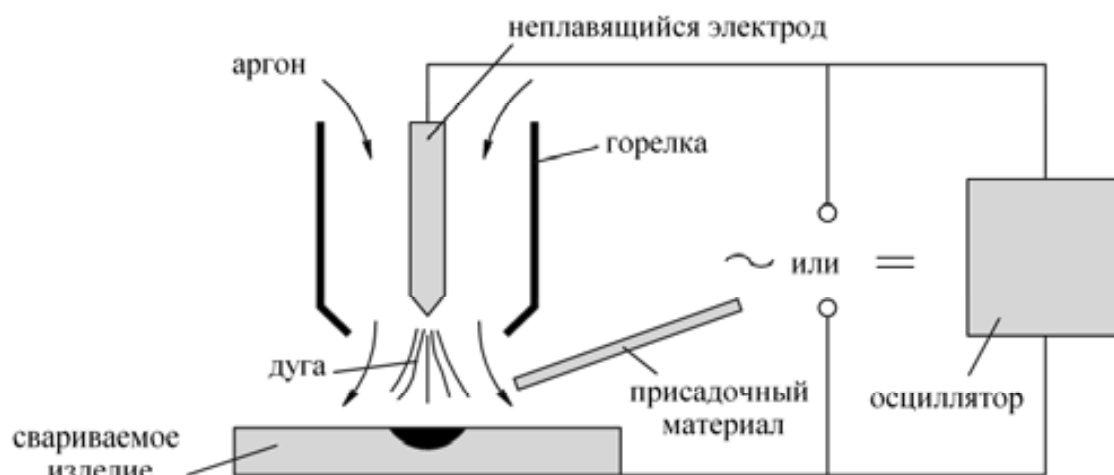


Рис. 4. Аргодуговая сварка неплавящимся электродом

Аргонная сварка может быть ручной, когда горелка и присадочный пруток находятся в руках сварщика, и автоматической, когда горелка и присадочная проволока перемещаются без непосредственного участия сварщика.

Для улучшения борьбы с пористостью к аргону иногда добавляют кислород в количестве 3–5 %. При этом защита металла становится более активной. Чистый аргон не защищает металл от загрязнений, влаги и других включений, попавших в зону сварки из свариваемых кромок или присадочного металла. Кислород же, вступая в химические реакции с вредными примесями, обеспечивает их выгорание или превращение в соединения, всплывающие на поверхность сварочной ванны. Это предотвращает пористость. При аргонной сварке неплавящимся электродом для зажигания дуги параллельно источнику питания подключается устройство, которое называется «осциллятор». Осциллятор для зажигания дуги подает на электрод высокочастотные высоковольтные импульсы, которые ионизируют дуговой промежуток и обеспечивают зажигание дуги после включения сварочного тока.

**Автоматическая сварка под флюсом** – дуговая сварка проволокой (проволочным электродом) под слоем флюса с механизированными опера-



циями подачи проволоки и перемещения дуги вдоль линии шва. Флюс — гранулированный порошок, получаемый чаще всего сплавлением компонентов с последующим дроблением. По назначению флюсы подразделяют на три группы: для сварки углеродистых и легированных конструкционных сталей; для сварки высоколегированных сталей и сварки цветных сплавов. По способу изготовления флюсы разделяют на плавленные и керамические. Плавленный флюс получают спеканием его составляющих и последующим дроблением до величины зерен от 0,25 до 3,0 мм. Керамические флюсы представляют собой механическую смесь порошкообразных и зернистых материалов. В состав флюсов входят шлакообразующие компоненты (кремний, марганец, алюминий в виде кремнезема, закиси марганца, глинозема, окись кальция), раскислители (Si, Mn) и легирующие элементы.

Дуговая сварка под флюсом может выполняться автоматами и полуавтоматами, однако последние используются редко. Проволока подается в зону сварки с помощью подающих роликов (рис. 5).

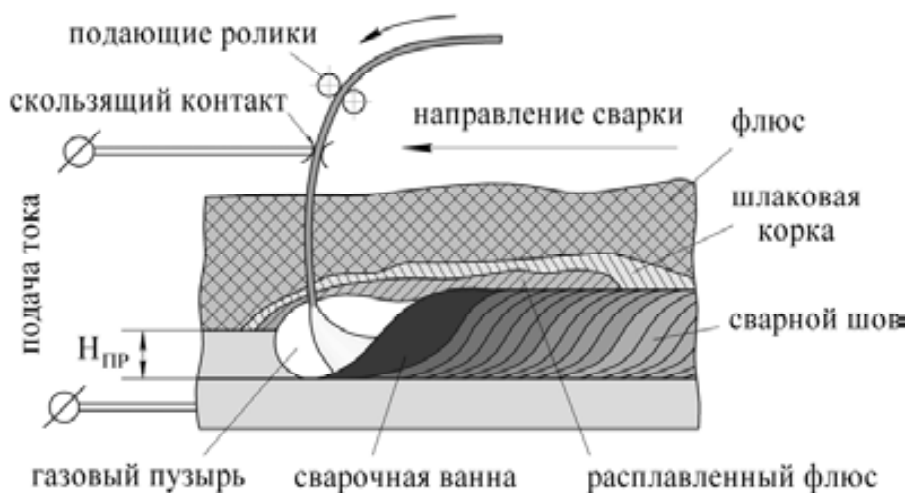


Рис. 5. Схема дуговой сварки под флюсом

Подвод тока к проволоке осуществляется скользким контактом. Плотный слой флюса, высыпаемого из бункера во время движения сварочного автомата, обеспечивает эффективную защиту расплавленного металла сварочной ванны от взаимодействия с воздухом. Дуга горит в газовом пузыре, который образуется парами и газами флюса и расплавленного металла. В результате металлургического взаимодействия шлака и расплавленного металла и кристаллизации металла сварочной ванны формируется шов с необходимым химическим составом и механическими свойствами. На поверхности шва располагается легко отделяемая шлаковая корка из затвердевшего флюса. Неизрасходованный флюс собирается во флюсоаппарат для дальнейшего применения при сварке.

Для полуавтоматической и автоматической сварки может применяться порошковая проволока, представляющая собой оболочку, выполненную из стальной полосы, полость которой заполнена флюсом (рис. 6).

Конструкция порошковой проволоки определяет некоторые особенности ее расплавления дугой. Сердечник проволоки на 50-70 % состоит из неметаллических материалов, и поэтому его электрическое сопротивление велико – в сотни раз больше, чем металлической оболочки. Поэтому практически весь сварочный ток проходит через металлическую оболочку, расплавляя ее. Плавление же сердечника, расположенного внутри металлической оболочки, происходит в основном за счет теплоизлучения дуги и теплопередачи от расплавляющегося металла оболочки. Ввиду этого сердечник может выступать из оболочки, касаться ванны жидкого металла или переходить в нее частично в нерасплавленном состоянии. Это увеличивает засорение металла шва неметаллическими включениями.

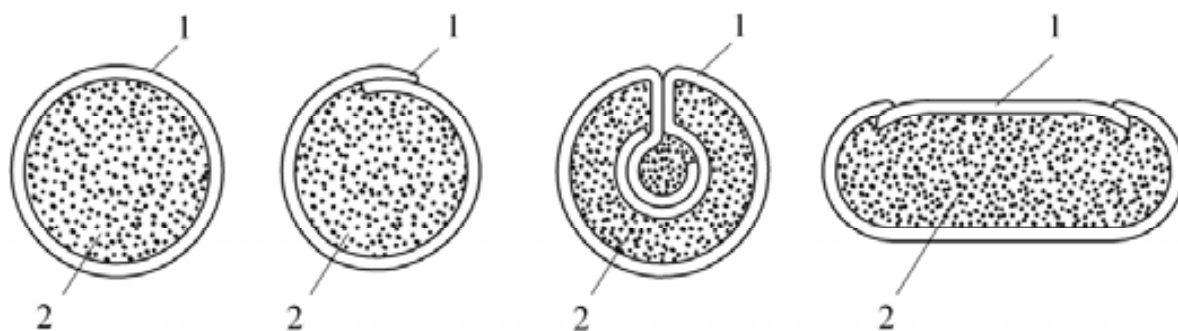


Рис.6. Сечения порошковой проволоки: 1 – стальная оболочка; 2 – флюс

Существенный недостаток порошковых проволок, сдерживающий их широкое промышленное применение, - повышенная вероятность образования в швах пор, вызываемого наличием пустот в проволоке. Кроме того, нерасплавившиеся компоненты сердечника, переходя в сварочную ванну, способствуют появлению газообразных продуктов. Диссоциация мрамора, окисление и восстановление углерода при нагреве и плавлении ферромарганца в сочетании с мрамором и другие процессы также могут привести к образованию в металле сварочной ванны газовой фазы. В результате этого в швах появляются внутренние и поверхностные поры. Порошковую проволоку можно использовать и при сварке в углекислом газе. Вероятность образования в швах пористости в этом случае снижается.

**Электрошлаковая сварка** основана на плавлении свариваемого и присадочного металлов теплотой, выделяемой при прохождении электрического тока через расплавленный шлак в период установившегося процесса сварки.

При электрошлаковой сварке дуговой разряд возникает только в самом начале процесса для создания жидкой шлаковой ванны, а затем плавление

непрерывно подаваемого электродного металла и оплавление кромок изделия происходит за счет теплоты тока при прохождении его через расплавленный шлак. Схема процесса электрошлаковой сварки показана на рис.7.

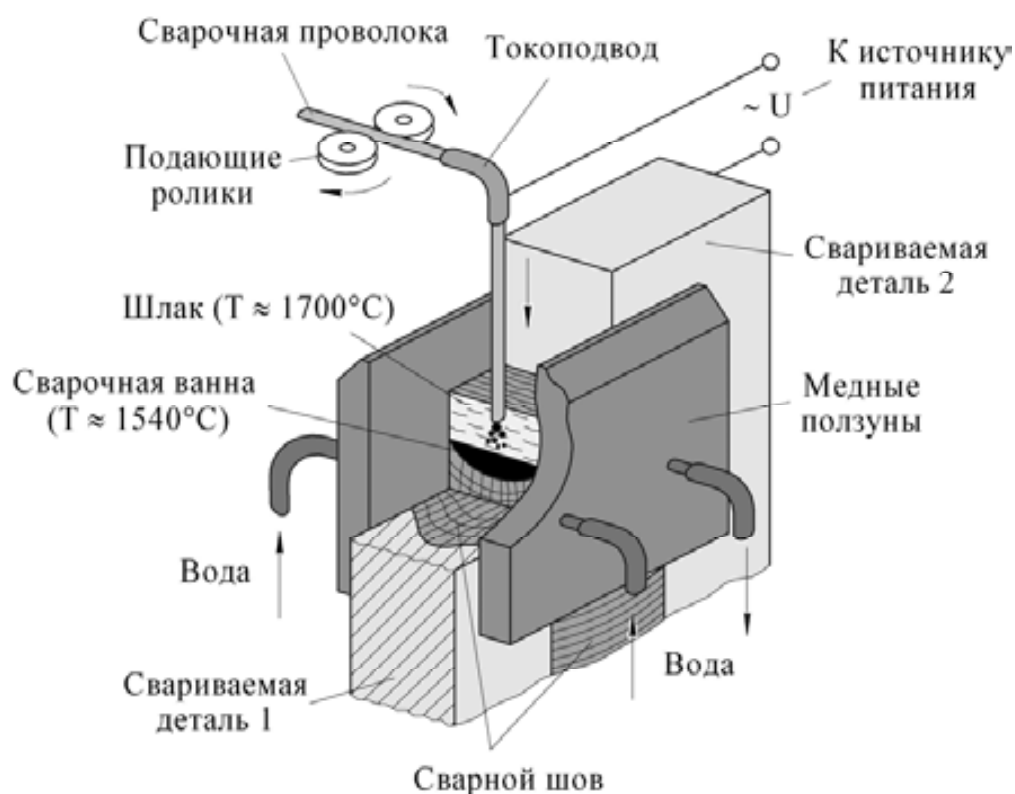


Рис.7. Схема процесса электрошлаковой сварки

Две свариваемые детали устанавливаются вертикально с зазором между кромками. Зазор с двух сторон закрывают медные водоохлаждаемые ползуны. Снизу зазор также закрывается специальным карманом. В зазор засыпается сварочный флюс и опускается сварочная проволока. В процессе сварки проволока подается вниз роликми, токоподвод осуществляется мундштуком. За счет прохождения тока между проволокой и изделием флюс нагревается и расплавляется. Расплавленный флюс образует шлак, который, будучи электропроводным, является источником тепла, приводящим к расплавлению проволоки и кромок и образованию сварочной ванны. Электрическая дуга отсутствует, так как она шунтируется расплавленным шлаком. Процесс сварки идет снизу вверх. Ползуны, охлаждаемые водой через трубки, перемещаются вверх вместе со сварочным автоматом и формируют сварной шов. Расплавленный флюс одновременно обеспечивает защиту сварочной ванны и участвует в металлургических процессах, обеспечивающих требуемое качество сварного шва.

Расход флюса при этом способе сварки невелик и не превышает 5 %-й массы наплавленного металла. Флюс используется такой же, как и для дуговой сварки, или специальный.

Так как выделение теплоты в шлаковой ванне происходит главным образом в области электрода, максимальная толщина металла, свариваемого одной проволокой, обычно ограничена 60 мм. При больших толщинах целесообразно использовать несколько проволок – обычно кратно трем – числу фаз источника питания. При необходимости проволокам придают колебания поперек зазора для его лучшего заполнения.

Электрошлаковая сварка широко используется для соединения металлов повышенной толщины: стали и чугуна различного состава, меди, алюминия, титана и их сплавов. К преимуществам способа относится возможность сварки за один проход металла практически любой толщины, что не требует удаления шлака и соответствующей настройки сварочной установки перед сваркой последующего прохода, как при других способах сварки. При этом сварку выполняют без снятия фасок на кромках. Для сварки можно использовать один или несколько проволочных электродов или электродов другого увеличенного сечения. В результате этого достигается высокая производительность и экономичность процесса, повышающиеся с ростом толщины свариваемого металла.

К недостаткам способа следует отнести то, что электрошлаковая сварка технически возможна при толщине металла более 16 мм и за редкими исключениями экономически выгодна при сварке металла толщиной более 40 мм. Чаще всего она используется для сварки изделий толщиной 100–500 мм. Способ позволяет сваривать только вертикальные швы. Недостатком электрошлаковой сварки является также увеличенная зона термического влияния, вызванная медленным нагревом и охлаждением металла. Это часто приводит к образованию неблагоприятных, крупнозернистых структур и требует термообработки для получения необходимых свойств сварного соединения.

Электрошлаковая сварка применяется при изготовлении массивных станин, валов мощных турбин, толстостенных котлов и барабанов. Ее применение вносит коренные изменения в технологию производства крупногабаритных изделий. Появляется возможность замены крупных литых или кованных деталей сварно-литыми или сварно-коваными из более мелких поковок или отливок.

**Контактная сварка** – сварка с применением давления, при которой нагрев производится теплотой, выделяемой при прохождении электрического тока через находящиеся в контакте соединяемые части. Контактная сварка – основной вид сварки давлением термомеханического класса. Основным признаком всех видов сварки давлением (контактная, диффузионная, холодная, трением и др.) является пластическая деформация металла в зоне контакта соединяемых деталей, необходимая для образования сварных соедине-

ний. При сварке происходит принудительное образование межатомных связей между кристаллическими решетками соединяемых деталей. Выделяют три основные стадии процесса образования сварного соединения при сварке давлением: формирование физического контакта, образование химических связей, развитие последующих процессов на границе полученного соединения и в объеме деталей.

На первой стадии обеспечивается сближение атомных поверхностей. Устраняются неровности и поверхностные пленки, формируется физический контакт, т. е. такой контакт тел, при котором атомы находятся на расстоянии, достаточном для начала межатомного взаимодействия.

На второй стадии происходит объединение электронных оболочек, возникают химические (для металлов – металлические) связи, и образуется сварное соединение.

На третьей стадии через границу соединения начинается взаимная диффузия атомов, развиваются различные сопутствующие сварке процессы, связанные с деформированием металла, его нагревом, со структурными изменениями в зоне соединения и прилегающих участках.

Контактная сварка осуществляется без расплавления и с расплавлением металла. В первом случае соединение происходит при деформации металла с созданием физического контакта между частицами соединяемых поверхностей и последующим образованием общей структуры за счет термопластической деформации, во втором случае возможно перемешивание расплава в замкнутом объеме (точечная сварка) и частичное его вытеснение (стыковая сварка оплавлением) с последующей кристаллизацией расплава и пластической деформацией закристаллизовавшегося металла.

Благодаря высокой производительности, надежности соединений, высокому уровню механизации и автоматизации, контактная сварка находит широкое применение в промышленности. Считается, что около 30 % всех сварных соединений получают с помощью контактной сварки.

В зависимости от профиля свариваемых материалов (лист, профильный прокат, труба), типа сварного соединения, толщины и марки металла применяют различные виды контактной сварки. Основными видами контактной сварки являются точечная, шовная и стыковая.

Точечная сварка – разновидность контактной сварки, при которой детали соединяются по отдельным участкам касания, ограниченным площадью торцов электродов, передающих усилие сжатия и подводящих электрический ток. Свариваемые заготовки накладывают друг на друга и зажимают обычно между двумя металлическими электродами с приложением к ним усилия  $F_{СВ}$  (рис. 8). После этого включается питание, которое вызывает в проводах, электродах и свариваемых деталях электрический ток величиной до нескольких единиц или десятков кА. В результате в зоне контакта заготовок по оси электродов начинается процесс нагрева и расплавления металла.

Уплотняющий поясok пластически деформированного металла, прилегающий к расплаву, предохраняет его от выплеска и взаимодействия с воздухом.

При достижении расплавленным металлом необходимого объема электрический ток выключается (фаза проковки), что приводит к прекращению тепловыделения в деталях и кристаллизации расплава. Проковка может выполняться без увеличения давления или с повышенным давлением. Через некоторое время с электродов снимается усилие сжатия. Полученное соединение напоминает по форме заклепку и называется сварной «точкой».

Структура и размеры сварной «точки» зависят от силы тока, продолжительности его протекания, формы и размеров рабочей поверхности электродов, усилия сжатия и состояния поверхностей деталей. Типичный диаметр ядра точки составляет 4–12 мм.

Электроды изготавливают в основном из меди и ее сплавов, обладающих высокой тепло- и электропроводностью.

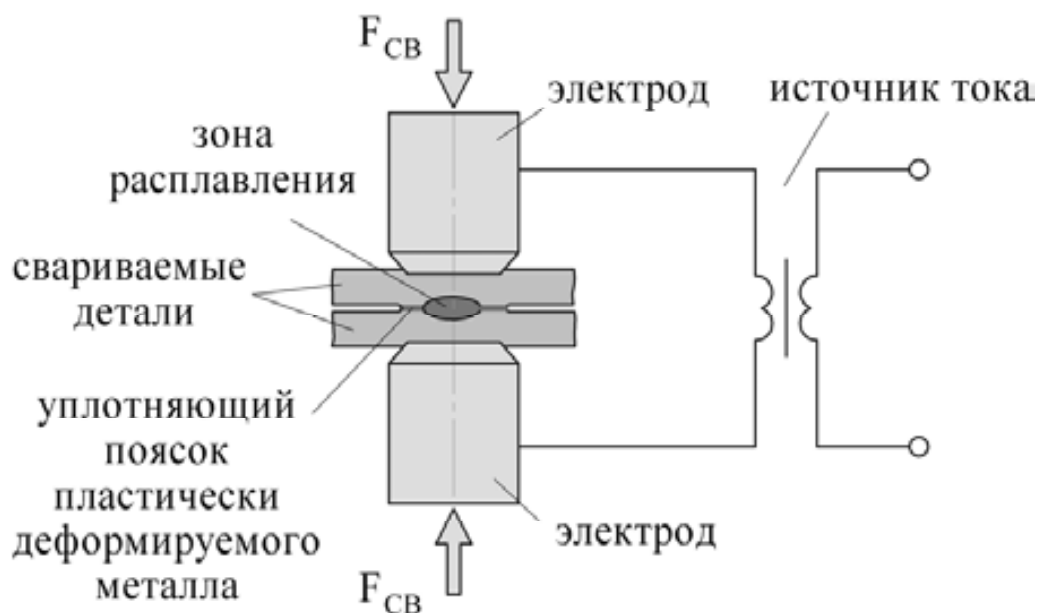


Рис.8. Схема точечной сварки

По количеству одновременно свариваемых точек точечная сварка может быть одно-, двух- и многоточечной.

Точечная сварка – наиболее распространенный способ контактной сварки. Этот способ широко используется в автомобиле-, вагоно- и авиастроении, строительстве, радиоэлектронике и т.д. Диапазон свариваемых толщин – от нескольких микрометров до 30 мм. Однако не рекомендуется выполнять точечные соединения элементов, отношение толщин которых  $\geq 3$ .

Шовная (роликовая) сварка – разновидность контактной сварки, при которой заготовки соединяются непрерывным или прерывистым швом, со-

стоящим из отдельных сварных точек, в результате приложения усилия сжатия и подвода тока к вращающимся дисковым электродам (роликам) (рис.9).

Заготовки накладывают друг на друга и зажимают обычно между двумя дисковыми электродами усилием сжатия  $F_{CB}$ . При подаче тока металл в зоне контакта деталей по оси электродов начинает нагреваться и расплавляться. По мере движения (прокатывания) заготовок между дисковыми электродами образуются новые сварные точки, перекрывающие или не перекрывающие друг друга. Как и при точечной сварке, не требуются специальные средства защиты расплава от взаимодействия с атмосферой.

Шовную сварку применяют в массовом производстве при изготовлении емкостных изделий с толщиной стенки 0,3–3 мм, где требуются герметичные швы – бензобаки, трубы, бочки, силфоны и др.

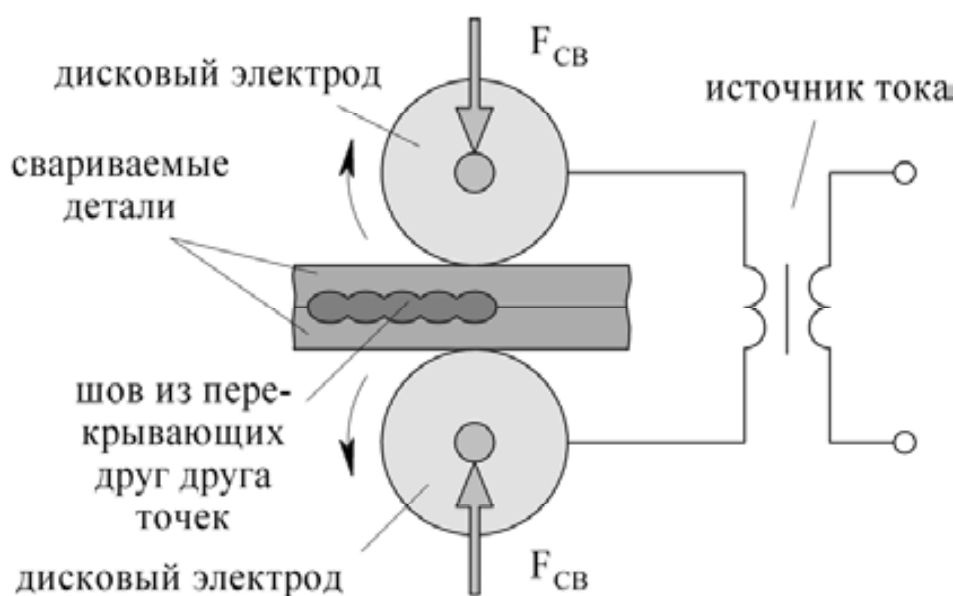


Рис. 9. Схема шовной (роликовой) сварки

В зависимости от характера перемещения деталей и подачи сварочного тока различают следующие способы шовной сварки (рис.10):

- непрерывную;
- прерывистую;
- шаговую.

Непрерывная сварка выполняется сплошным швом при постоянном протекании тока, непрерывном движении заготовок, а также при постоянном давлении дисковых электродов на свариваемые поверхности. Она получила ограниченное применение из-за быстрого износа роликов и сильного перегрева контактирующих с ними поверхностей деталей. Важное значение при непрерывной сварке имеют тщательная зачистка свариваемых поверхностей, одинаковая толщина и однородность состава соединяемых изделий.

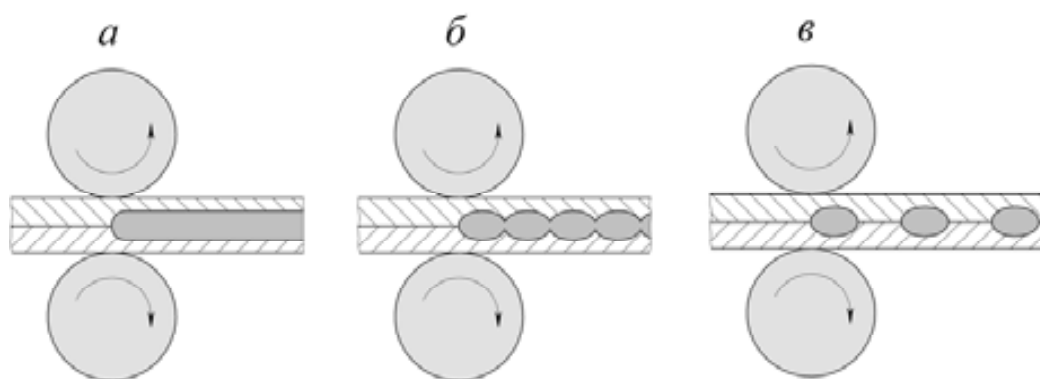


Рис.10. Способы шовной сварки: *а* – непрерывная; *б* – прерывистая; *в* – шаговая

Наиболее распространена прерывистая шовная сварка, осуществляемая при импульсной (прерываемой) подаче тока, непрерывном перемещении заготовок и постоянном давлении роликов. При каждом импульсе сварочного тока формируется единичная литая зона. Для образования герметичного шва с перекрывающимися сварными точками подбирается определенное соотношение скорости вращения дисковых электродов и частоты импульсов тока.

При шаговой шовной сварке к роликам прикладывается постоянное давление, детали перемещаются прерывисто (пошагово), а ток подается только во время остановки роликов. При этом контактирующие поверхности роликов и заготовок меньше перегреваются. Однако машины для данного способа сварки конструктивно сложнее и менее производительны.

Стыковая сварка – разновидность контактной сварки, при которой детали соединяются по поверхности стыкуемых торцов в результате подвода тока и применения усилия сжатия. Стыковой сваркой соединяют проволоку, стержни, трубы, полосы, рельсы, цепи и другие детали.

Свариваемые детали закрепляются в зажимах-электродах и сжимаются осевым усилием  $F_{CB}$  (рис.11). Левая плита обычно неподвижна. При включении сварочного трансформатора через заготовки протекает электрический ток большой силы и низкого напряжения, нагревающий их. Наибольшее количество теплоты выделяется на стыке деталей. В отличие от других видов контактной сварки, при стыковой сварке свариваемые детали закрепляются в зажимах с усилием сжатия  $F_{CЖ}$ , в 1,5–2 раза превышающим  $F_{CB}$ .

В зависимости от степени нагрева торцов заготовок, различают технологии стыковой сварки сопротивлением и оплавлением. Стыковую сварку с разогревом стыка до пластического состояния называют сваркой сопротивлением, стыковую сварку с разогревом стыка до оплавления – сваркой оплавлением.



Сварка сопротивлением применяется только для деталей с небольшим компактным сечением. Наиболее широко применяется стыковая сварка оплавлением, которая имеет следующие преимущества:

- более прочно соединяет детали;
- нет необходимости в тщательной предварительной механической обработке соединяемых поверхностей и подгонке стыков;
- возможно применение для разнородных металлов и сплавов.

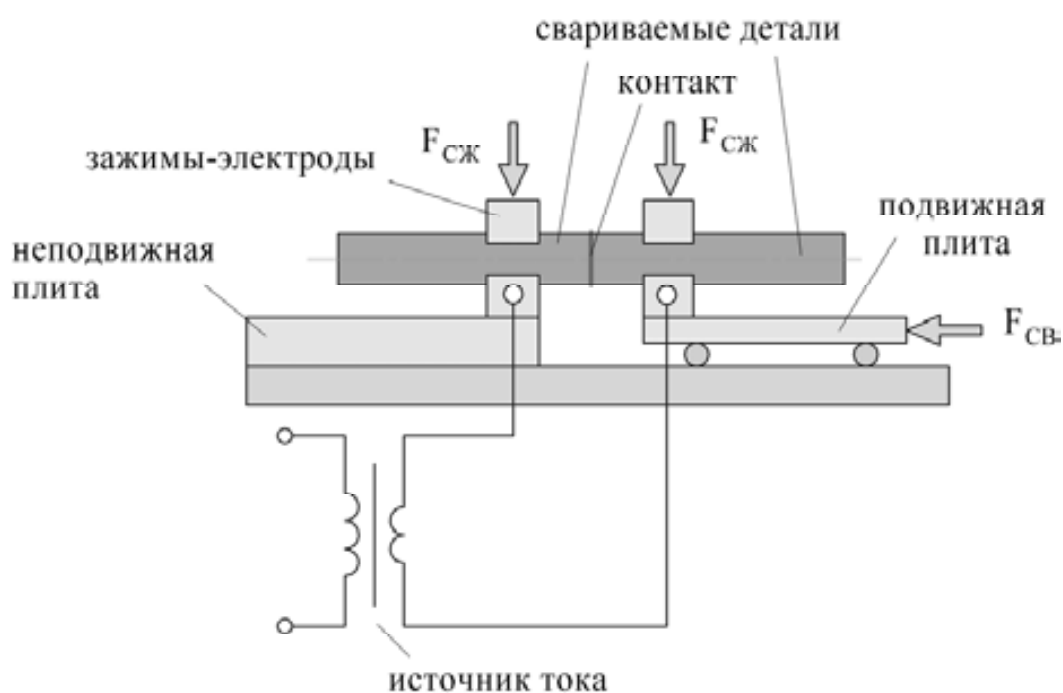


Рис.11. Схема контактной стыковой сварки

При сварке сопротивлением детали вначале сжимают осевым усилием для образования плотного соприкосновения свариваемых торцов. Затем подается электрический ток, при прохождении которого стыкуемые поверхности нагреваются до пластического состояния. Далее выполняется осадка (сжатие нарастающим усилием) заготовок с образованием соединения в твердой фазе. При этом ток отключают до окончания осадки.

Сварка сопротивлением используется для соединения деталей круглого или прямоугольного сечения площадью, как правило, до  $200 \text{ мм}^2$  в зависимости от металлов. Для обеспечения равномерного нагрева торцов они должны быть точно подогнаны и предварительно очищены механическим или химическим способом.

Сварка оплавлением может осуществляться с непрерывным или прерывистым оплавлением.

При стыковой сварке непрерывным оплавлением детали постепенно сближают при включенном источнике тока. Касание торцов происходит по

отдельным выступам. Поскольку площадь образующихся контактов-перемычек очень мала, то из-за высокой плотности протекающего через них тока они быстро нагреваются и расплавляются. Часть металла взрывается и в виде искр вылетает из стыка. В выбрасываемом расплаве присутствуют и загрязнения с поверхностей заготовок. Дальнейшее сближение деталей приводит к образованию и оплавлению новых контактов-перемычек. В результате этого непрерывного процесса на торцах образуется слой жидкого металла. После того, как торцы оплавятся по всей поверхности, производится осадка. Торцы быстро сближаются с большим усилием. При этом жидкий металл с оксидными пленками выдавливается из стыка наружу и при затвердевании образует грат (металл, выдавливаемый осадкой), который обычно удаляют в горячем виде.

Сварка прерывистым оплавлением производится чередованием плотного и неплотного контакта свариваемых поверхностей при включенном сварочном токе. Небольшие возвратно-поступательные движения подвижного зажима периодически замыкают сварочную цепь в месте контакта деталей до тех пор, пока торцы их не нагреются до температуры 800...900 °С. Затем производится оплавление и осадка. Методом прерывистого оплавления свариваются низкоуглеродистые стали в тех случаях, когда мощность машины недостаточна для производства сварки с непрерывным оплавлением. Этот способ также связан с дополнительным расходом металла, поэтому иногда подогрев осуществляется методом сопротивления (включается ток при замкнутой сварочной цепи), а затем разводятся детали, и переходят к оплавлению и осадке.

Сварка оплавлением позволяет соединять детали с сечением сложной формы площадью до 100 000 мм<sup>2</sup>. При этом, в отличие от сварки сопротивлением, не требуется тщательная предварительная подготовка торцов заготовок. Стыковая сварка оплавлением применяется для соединения трубопроводов, арматурных стержней железобетонных изделий, железнодорожных рельсов (бесстыковые пути) в стационарных и полевых условиях, длинномерных заготовок из различных конструкционных сталей и сплавов и цветных металлов. Стыковая сварка оплавлением обеспечивает экономию легированной стали при производстве режущего инструмента. Например, данным способом сваривается рабочая часть сверла из инструментальной стали с хвостовой частью из обычной стали.

**Газовая сварка** основана на плавлении свариваемого и присадочного металлов высокотемпературным газокислородным пламенем. В качестве горючего для сгорания в кислороде применяют ацетилен, водород, пропан-бутановую смесь, пары керосина, бензина, природный, светильный, нефтяной, коксовый и другие газы.

Горючий газ из баллона или специального газового генератора поступает в сварочную горелку (рис.12). Из баллона в горелку поступает кисло-

род. В горелке они смешиваются в определенном соотношении и на выходе из сопла поджигаются. Пламя расплавляет кромки свариваемого изделия, присадочный пруток, а также выполняет функции защиты расплавленного металла от атмосферы. Регулировка расхода кислорода и горючего газа осуществляется соответствующими вентилями.

Основными параметрами режима газовой сварки являются мощность пламени, угол наклона горелки и диаметр присадочного прутка. Мощность пламени зависит от толщины металла и его теплофизических свойств. Чем больше толщина металла и выше температура плавления и теплопроводность, тем больше должна быть мощность пламени. Мощность пламени устанавливается расходом горючего газа и кислорода.

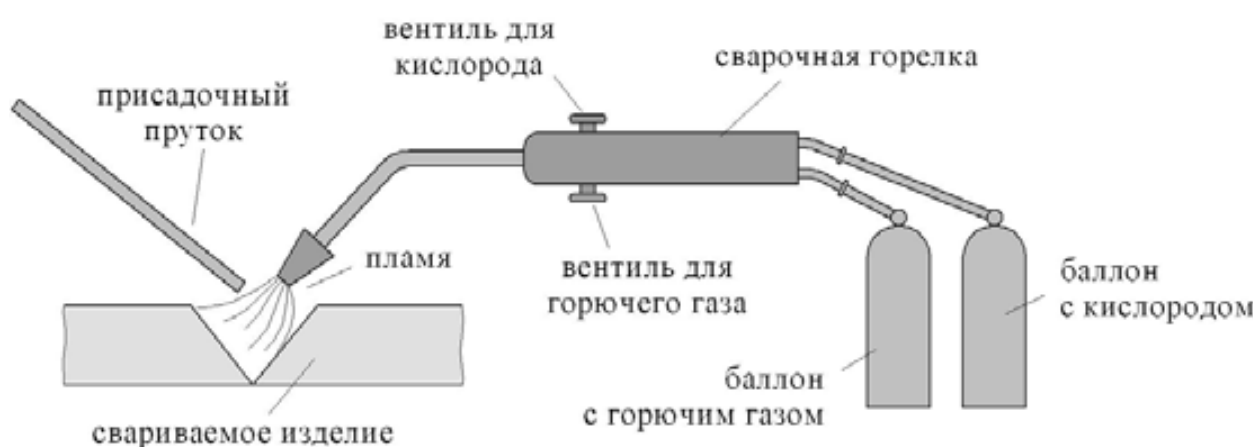


Рис. 12. Схема газовой сварки

Основным преимуществом газовой сварки является ее независимость от электрических источников питания. Это делает удобным ее применение в строительных и монтажных условиях, где не всегда имеется силовая электрическая сеть. При газовой сварке легко изменяется тепловложение в металл за счет изменения угла наклона горелки и ее расстояния до изделия, что позволяет избегать прожогов даже при сварке тонкого металла. Типичным примером является сварка водопроводных труб малого диаметра, когда отсутствует доступ к обратной стороне шва для размещения подкладок или подварки корня. Оборудование для газовой сварки достаточно мобильно и транспортабельно.

Существенное отличие газовой сварки от дуговой сварки – более плавный и медленный нагрев металла. Это обстоятельство определяет применение газовой сварки для соединения металлов малых толщин, требующих подогрева в процессе сварки (например, чугун и некоторые специальные стали), замедленного охлаждения (например, инструментальные стали) и т. д. Благодаря универсальности, сравнительной простоте и портативности

оборудования газовая сварка целесообразна при выполнении ремонтных работ.

Недостатками газовой сварки являются ее низкая производительность, большая зона термического влияния, высокие требования к квалификации сварщика. В связи с этим на машиностроительных предприятиях при стабильной программе выпуска продукции газовая сварка не может конкурировать с дуговой и практически не применяется.

**Сварка трением** это твердофазный процесс, в котором выделяемое при трении тепло используется для получения высококачественного сварного соединения из одинаковых или разнородных металлов. При сварке трением в основном сваривают детали круглого сечения (ротационная сварка).

Процесс сварки происходит следующим образом (рис.13). Вначале одна из заготовок приводится во вращение, а другая неподвижна и удерживается в закрепленном положении. Затем заготовки приводятся в контакт с осевым усилием, необходимым для процесса осадки. После осадки вращение прекращается, а осевое усилие увеличивается. Процесс осадки продолжается еще несколько секунд, пока действует сжимающее усилие. При этом происходит диффузия атомов контактирующих поверхностей, что приводит к образованию прочных металлических связей между обоими материалами и, следовательно, к увеличению прочности соединения.

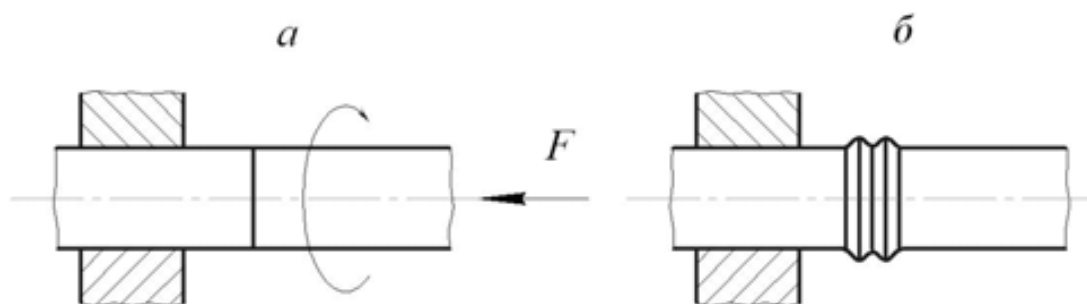


Рис.13. Принципиальная схема сварки трением: *а* – перед началом сварки; *б* – в конце сварки

Относительная скорость вращения может изменяться в широком диапазоне без ущерба для качества соединения. Для каждой комбинации материалов или форм соединяемых изделий существуют оптимальные скорости. Для повышения качества металла в зоне соединения рекомендуется использовать как можно более низкие скорости вращения, поскольку при высоких скоростях возникает эффект полировки. В результате для размягчения прилегающих поверхностей требуется большее время нагревания. Это ведет к нагреву большего объема материала по оси заготовок, т.е. к расширению зоны теплового влияния и ухудшению качества металла вблизи шва. При та-

ком способе сварки в месте стыка фат (воротник), имеющий правильную форму и удаляемый с помощью несложного приспособления в машине.

Сварка трением, по сравнению с обычной сваркой, не требует использования электродов, флюсов, присадочного материала, увеличивающих стоимость изготовления соединения. Деталь после сварки требует минимальной механической обработки. Достоинством сварки трением является также минимальная подготовка поверхностей к свариванию. В процессе сварки происходит перемещение размягченных слоев металла к границам свариваемой поверхности. При этом происходит удаление окислов и загрязнений, которые могли находиться в зоне сварки. Малая продолжительность процесса сварки (несколько секунд) обеспечивает малую зону термического влияния. Время сварки практически не зависит от размеров соединяемых деталей, так как трение происходит по всей стыкуемой поверхности.

Расчеты и опыт практического применения сварки трением показывают, что ее пока целесообразно применять для сварки деталей диаметром от 6 до 100 мм. Наиболее эффективно применение сварки трением для изготовления режущего инструмента, при производстве составных сварно-кованых, сварно-литых или сварно-штампованных деталей. Она оказывается незаменимой при соединении трудно свариваемых или вовсе не сваривающихся другими способами разнородных материалов, например, стали с алюминием, аустенитных сталей с перлитными сталями. Эффективно применение сварки трением и для соединения пластмассовых заготовок.

Способ находится еще в начальной стадии развития, но уже широко используется в производстве сварного металлорежущего инструмента для соединения режущей части с державкой.

**Плазменная сварка** – это сварка с помощью направленного потока плазменной дуги. Имеет много общего с технологией аргонной сварки.

Плазмой называется частично или полностью ионизированный газ, состоящий из нейтральных атомов и молекул, а также электрически заряженных ионов и электронов. В таком определении обычная дуга может быть названа плазмой. Однако по отношению к обычной дуге термин «плазма» практически не применяют, так как обычная дуга имеет относительно невысокую температуру и обладает невысоким запасом энергии по сравнению с традиционным понятием плазмы.

Для повышения температуры и мощности обычной дуги и превращения ее в плазменную используются два процесса: сжатие дуги и принудительное вдувание в нее плазмообразующего газа. Схема получения плазменной дуги приведена на рис.14. Сжатие дуги осуществляется за счет размещения ее в специальном устройстве – плазмотроне, стенки которого интенсивно охлаждаются водой. В результате сжатия уменьшается поперечное сечение дуги и возрастает ее мощность – количество энергии, приходящееся на единицу площади. Температура в столбе обычной дуги, горящей в

среде аргона и паров железа составляет 5000–7000 °С. Температура в плазменной дуге достигает 30 000 °С.

Одновременно со сжатием в зону плазменной дуги вдувается плазмообразующий газ, который нагревается дугой, ионизируется и в результате теплового расширения увеличивается в объеме в 50–100 раз. Это заставляет газ истекать из канала сопла плазмотрона с высокой скоростью. Кинетическая энергия движущихся ионизированных частиц плазмообразующего газа дополняет тепловую энергию, выделяющуюся в дуге в результате происходящих электрических процессов. Поэтому плазменная дуга является более мощным источником энергии, чем обычная.

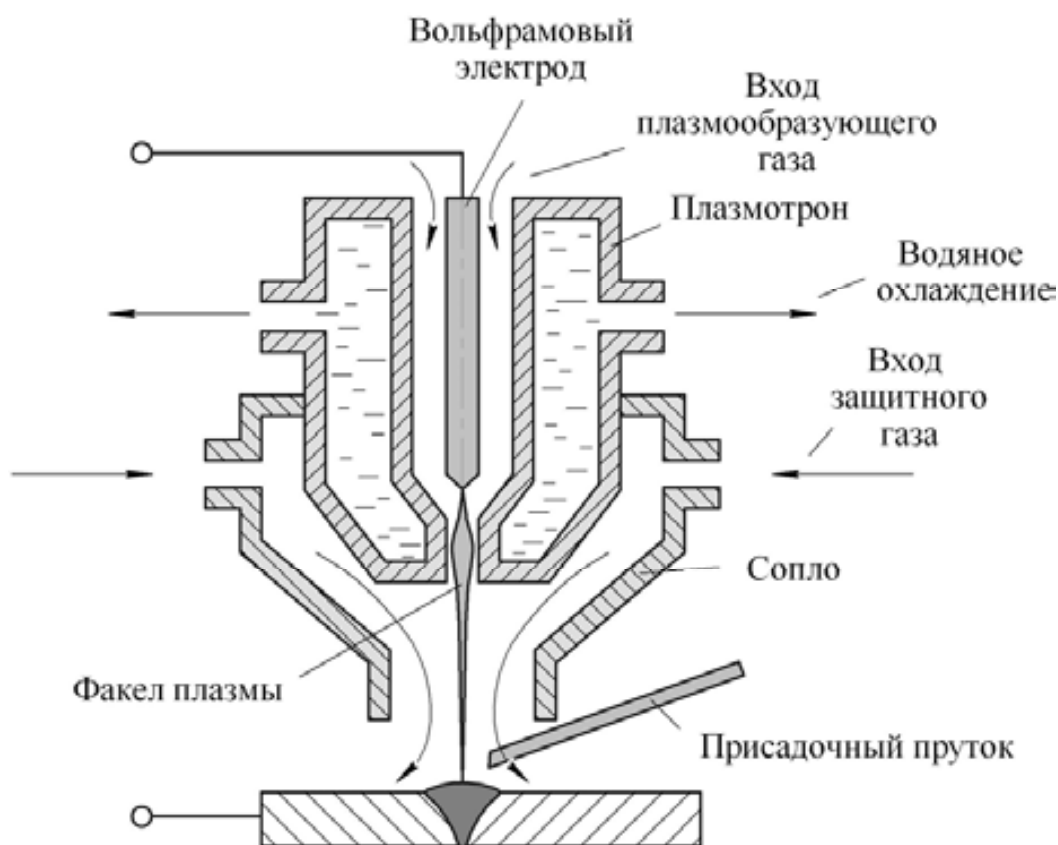


Рис.14. Схема процесса плазменной сварки

Основными чертами, отличающими плазменную дугу от обычной, являются:

- более высокая температура;
- меньший диаметр дуги;
- цилиндрическая форма дуги (в отличие от обычной конической);
- давление дуги на металл в 6–10 раз выше, чем у обычной;
- возможность поддерживать дугу на малых токах (0,2–30 А).

Все это делает плазменную дугу, по сравнению с обычной, более универсальным источником нагрева металла. Она обеспечивает более глубокое проплавление металла при одновременном уменьшении объема его расплав-

ления. На рис. 15 приведена форма проплавления для обычной дуги и плазменной.

На рис. 15 видно, что плазменная дуга – более концентрированный источник нагрева и позволяет без разделки кромок сваривать большие толщины металла. Из-за своей цилиндрической формы и возможности существенно увеличить длину такая дуга позволяет вести сварку в труднодоступных местах, а также при колебаниях расстояния от сопла горелки до изделия.



Рис. 15. Форма проплавления для обычной и плазменной дуги:  
*а* – для обычной дуги; *б* – для плазменной дуги

Возможны две схемы процесса:

- сварка плазменной дугой, когда дуга горит между неплавящимся электродом и изделием;
- плазменной струей, когда дуга горит между неплавящимся электродом и соплом плазмотрона и выдувается потоком газа.

Первая схема наиболее распространена.

В качестве плазмообразующего газа при сварке используется обычно аргон, иногда с добавками гелия или водорода. В качестве защитного газа используется чаще всего также аргон. Материал электрода – вольфрам, активированный иттрием, лантаном или торием, а также гафний и медь.

**Холодная сварка** – сварка давлением при значительной пластической деформации без внешнего нагрева соединяемых поверхностей. Физическая сущность процесса заключается в сближении за счет пластической деформации свариваемых поверхностей до образования металлических связей между ними и получения таким образом прочного сварного соединения. Исследованиями установлено, что при сдавливании тонкий поверхностный слой толщиной менее 1 мкм соединяемых элементов нагревается до температуры плавления. Холодной сваркой соединяются металлы, имеющие высокую пластичность при комнатной температуре (Al, Au, Ag, Cu, Ni, Pb и др.). В недостаточно пластичных металлах при больших деформациях могут образовываться трещины. Высокопрочные металлы и сплавы холодной сваркой не сваривают.

Холодной сваркой выполняют точечные, шовные, стыковые соединения (рис.16). Холодной сваркой соединяют металлы и сплавы толщиной 0,2–15 мм.

Прочность соединения зависит от глубины вдавливания инструмента и качества подготовки поверхности. Минимальная глубина вдавливания инструмента определяется свойствами материала.

Главными характеристиками процесса являются давление и величина деформаций. В зависимости от состава и толщины свариваемого металла давление составляет 150–1000 МПа, степень относительной деформации 50–90 %.

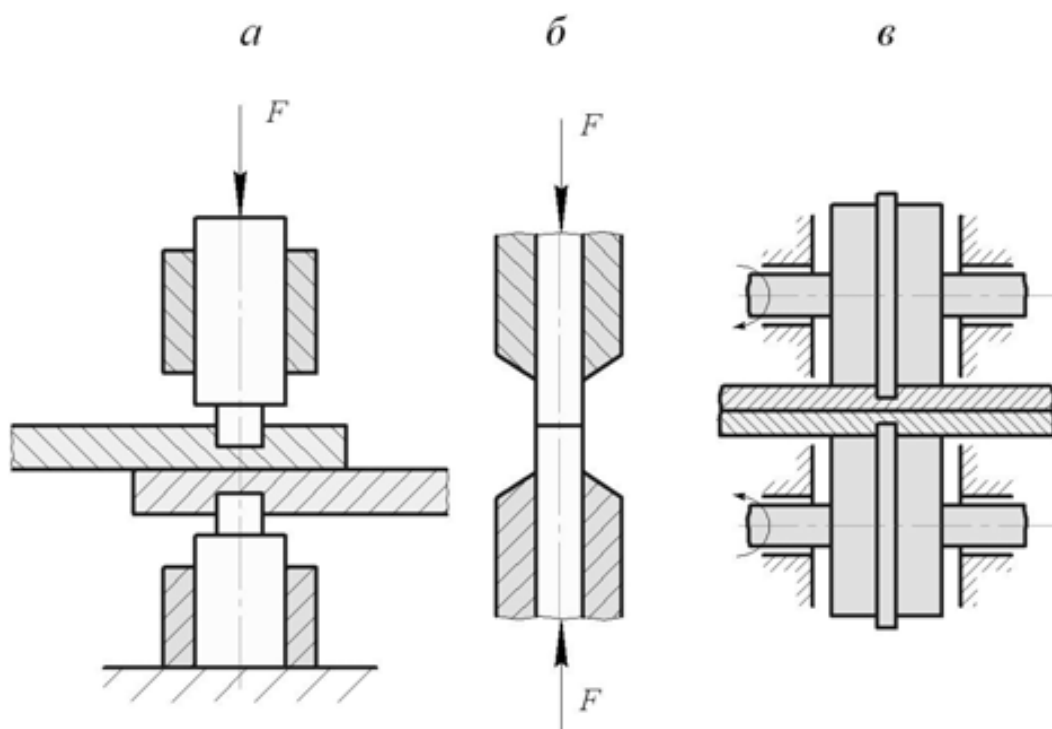


Рис. 16. Схема холодной сварки: *а* – сварка внахлестку (точечная); *б* – сварка встык; *в* – шовная сварка

Выбор способа сварки определяется следующими факторами:

- маркой свариваемого материала;
- требуемыми свойствами сварного соединения;
- конструкцией сборочной единицы.

Необходимо принимать во внимание и дополнительные факторы, влияющие на выбор способа сварки (например, общий объем сварки в изделии, серийность и стоимость процесса сварки), и рассматривать их с учетом конкретных условий производства сварной конструкции.

Стандарты, регламентирующие основные типы, конструктивные элементы, размеры и условные обозначения сварных соединений, выполненных различными видами сварки, приведены в табл. 3.



Стандарты, регламентирующие основные типы, конструкционные элементы, размеры и условные обозначения сварных соединений

ГОСТ	Наименование
5264-80	Ручная дуговая сварка. Соединения сварные
8713-79	Сварка под флюсом. Соединения сварные
11533-75	Автоматическая и полуавтоматическая дуговая сварка под флюсом. Соединения сварные под острыми и тупыми углами
11534-75	Ручная дуговая сварка. Соединения сварные под острыми и тупыми углами
14771-76	Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные
14776-79	Дуговая сварка. Соединения сварные
14806-80	Дуговая сварка алюминия и алюминиевых сплавов в инертных газах. Соединения сварные
15164-78	Электрошлаковая сварка. Соединения сварные
15878-79	Контактная сварка. Соединения сварные
16038-80	Сварка дуговая. Соединения сварные трубопроводов из меди и медно-никелевого сплава
16310-80	Соединения сварные из полиэтилена, полипропилена и винипласта
23518-79	Дуговая сварка в защитных газах. Соединения сварные под острыми и тупыми углами
23792-79	Соединения контактные, электрические, сварные

## 5. ВИДЫ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И ШВОВ

Вид сварного соединения определяется взаимным расположением свариваемых элементов. Различают стыковые, нахлесточные, тавровые и угловые соединения (рис.17).

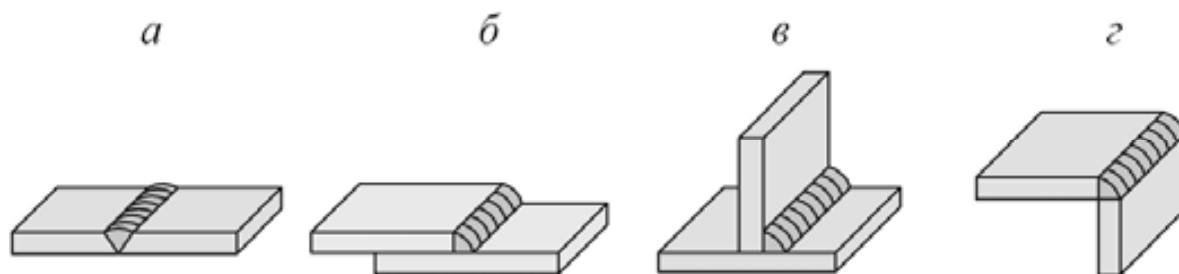


Рис. 17. Виды сварных соединений: *а* – стыковое; *б* – нахлесточное; *в* – тавровое; *г* – угловое

В **стыковых соединениях** части свариваемых изделий соединяются торцами или кромками, причем поверхность одной части является продолжением поверхности другой части (см. рис.17а). Стыковые соединения наиболее рациональны по расходу присадочного металла, имеют наименьшую концентрацию напряжений, при правильном подборе материалов и технологии обеспечивают равнопрочность соединения с основным материалом. Толщина свариваемых элементов в соединениях такого вида почти неограниченна; качество стыковых соединений можно контролировать наиболее надежными способами.

В **нахлесточных соединениях** (внахлестку) соединяемые элементы частично находят друг на друга (см. рис. 17б). Эти соединения отличаются простотой обработки под сборку и сварку, но они менее экономичны, чем стыковые, так как увеличивают расход металла на изделие. Контроль качества соединений внахлестку затруднен. Соединения внахлестку не рекомендуется применять в конструкциях, подвергающихся действию переменных нагрузок, так как предел выносливости таких соединений ниже, чем стыковых.

Разновидностью соединений внахлестку являются соединения с накладками (рис.18). Накладки (одна или две) служат для усиления стыка между частями изделия или для соединения частей изделия.

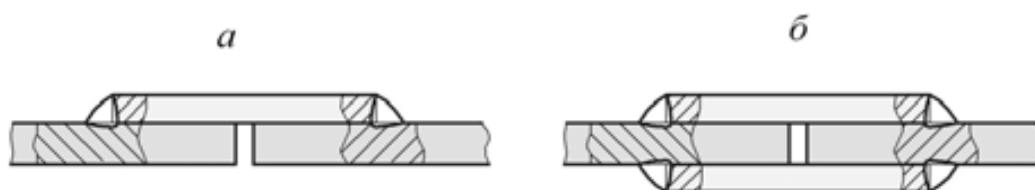


Рис. 18. Нахлесточные соединения с накладками:  
а – с одной накладкой; б – с двумя

**Тавровым** называется сварное соединение, в котором к боковой поверхности одного элемента примыкает под углом и приварен торцом другой элемент (см. рис.17в). Эти соединения выполняются угловыми швами, они широко применяются в конструкциях, отличаются простотой исполнения, высокой прочностью и экономичностью.

**Угловым** называется соединение двух элементов, расположенных под прямым или произвольным углом и сваренных в месте примыкания их краев (см. рис.17г). В угловых соединениях части изделия расположены под углом. Угол между свариваемыми деталями, как правило, равен  $90^\circ$ , однако может быть и другим, что обуславливается особенностями сварной конструкции. По выполнению угловые соединения бывают односторонние и двусторонние.

Сварные соединения, выполненные контактной сваркой, определяются видом сварки.

Классификация сварных швов производится по различным признакам в зависимости от условий изготовления и эксплуатации сварных конструкций. По форме поперечного сечения швы подразделяют на стыковые и угловые (рис. 19).

**Стыковые** швы выполняют в сварных стыковых соединениях, **угловые** швы используют в угловых, тавровых и нахлесточных соединениях.

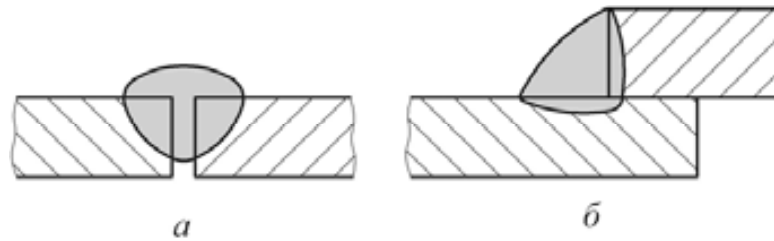


Рис. 19. Вид сварных швов по форме поперечного сечения:  
а – стыковой; б – угловой

Особой разновидностью швов являются **проплавные** швы, которые используют в тавровых (рис. 20а) и в нахлесточных (рис.20б) соединениях. Применение проплавных швов обычно ограничивается деталями толщиной до 10 мм. Проплавные швы получаются в результате полного проплавления верхнего, а иногда и последующих листов, и частичного проплавления нижнего листа (детали).

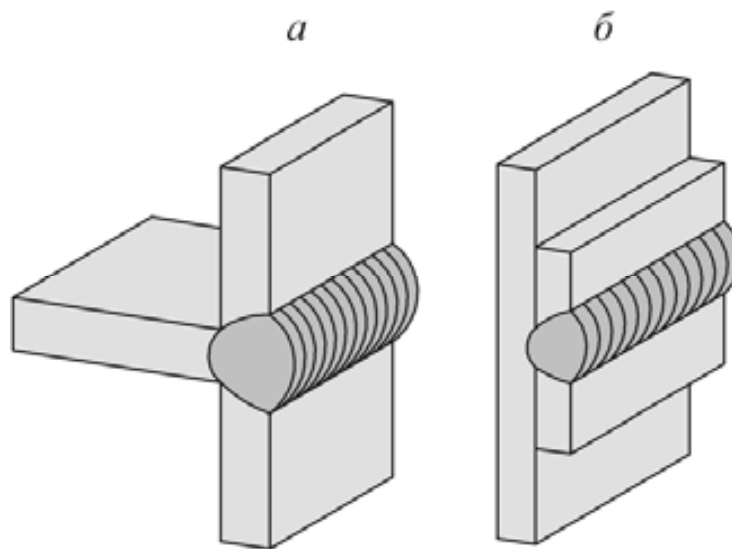


Рис.20. Виды проплавных швов:  
а – тавровое соединение; б – нахлесточное соединение

Разновидностью проплавных швов являются пробочные проплавные швы (рис.21).

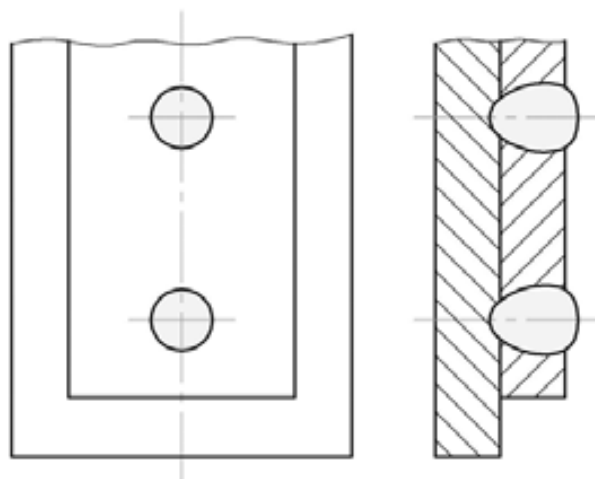


Рис.21. Пробочный проплавной шов

Пробочные соединения ставят при нахлесточном расположении листов, проплавляя верхний более тонкий лист, в результате чего образуются круглые проплавные сварные соединения (электрозаклепки). Такие электрозаклепки можно ставить как без отверстия в привариваемом листе, так и по отверстию. В первом случае происходит сквозное проплавление верхнего листа и расплавление поверхности нижнего, как это бывает при сварке прорезного шва. Во втором случае заправляется отверстие в верхнем листе и проплавляется поверхность нижнего. Первый способ дешевле, так как не требует предварительной пробивки отверстий. Кроме того, он не требователен к точности установки электрода на изделие, так как эта операция не связана с расположением отверстий в верхнем листе. Однако применение этого способа лимитируется толщиной верхнего листа; при толщинах свыше 6–8 мм требуется слишком большой ток для сквозного проплавления листов и способ становится невыгодным или невозможным. Поэтому при толщинах свыше 6–8 мм предпочитают постановку электрозаклепок по отверстиям в верхнем листе.

По назначению швы делятся на **рабочие**, передающие расчетные усилия, и **связующие**, соединяющие элементы конструкции в единое целое, размеры последних назначаются по конструктивным соображениям.

По протяженности швы бывают **непрерывными** – сплошными и **прерывистыми** (рис.22).

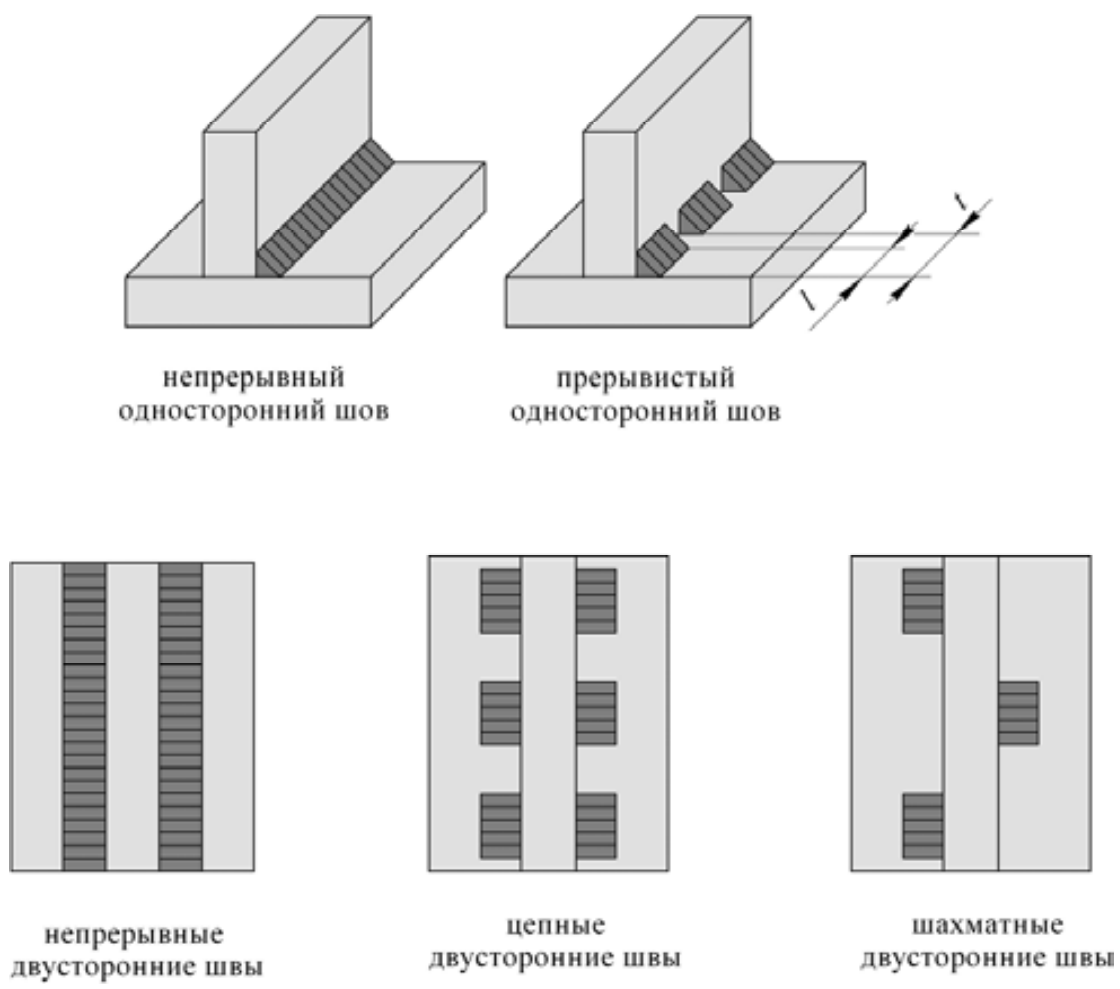


Рис. 22. Виды сварных швов по протяженности

Прерывистые швы применяют в слабонагруженных соединениях или в соединениях, в которых не требуется создание герметичности. Прерывистые швы находят применение только при ручной сварке, они позволяют сократить объем расплавленного металла. Прерывистые швы могут быть расположены в виде цепочки или в шахматном порядке. Длину провариваемых участков обычно делают  $l = 50 \div 150$  мм. Расстояние  $t$  называют шагом прерывистого шва и обычно делают вдвое больше  $l$ .

По количеству слоев, наложенных при сварке, швы бывают **однопроходными** и **многопроходными**. Многопроходные приходится часто применять при ручной сварке, когда малая сила тока не позволяет разогреть до плавления большой объем металла.

По количеству слоев сварка бывает **однослойной** и **многослойной**, по числу проходов – однопроходной и многопроходной.

Многослойный шов (рис.23) используется при сварке толстого металла, а также, чтобы уменьшить зону термического влияния.

**Проход** – однократное перемещение источника тепла в одном направлении при сварке или наплавке. **Валиком** называется часть металла сварного

шва, которая была наплавлена за один проход. **Слой сварного шва** – металл шва, состоящий из одного, двух или нескольких валиков, которые размещены на одном уровне поперечного сечения шва.

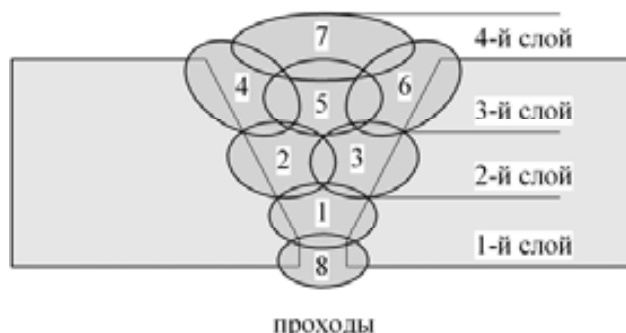


Рис. 23. Многослойный шов

По положению в пространстве швы в момент их выполнения разделяют на **нижние, вертикальные, горизонтальные** и **потолочные** (рис.24).

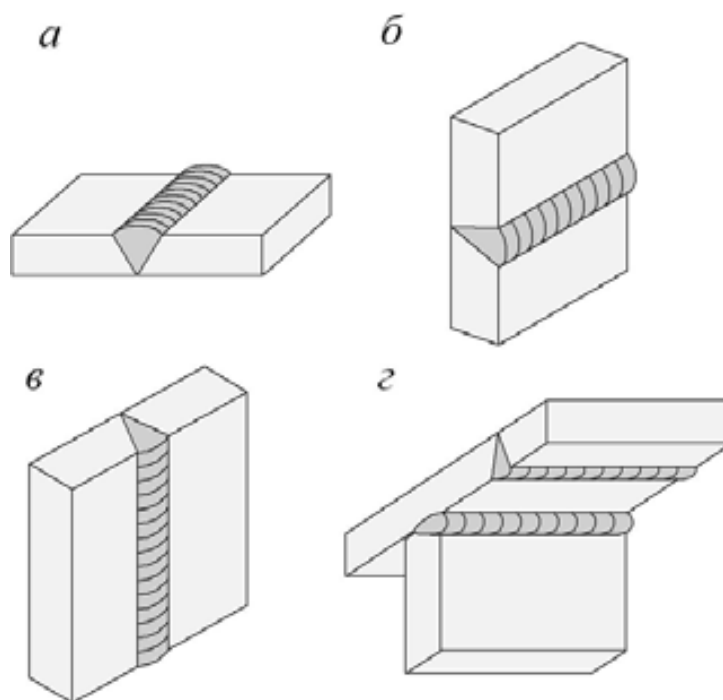


Рис. 24. Пространственные положения швов: *а* – нижние; *б* – горизонтальные; *в* – вертикальные; *г* – потолочные

Такое деление вызвано технологическими особенностями выполнения швов, оказывающими влияние на качество швов и их прочность. Швы на горизонтальной плоскости, а также слегка наклонные (при угле наклона  $\leq 60^\circ$ ) называются нижними швами; швы на плоскости, наклоненной на  $60 - 120^\circ$ , относят к вертикальным швам; а швы на плоскости, наклоненной на  $120^\circ$

–180 °, – к потолочным швам. Горизонтальными называют стыковые швы, расположенные на вертикальной или наклонной плоскости горизонтально.

Наиболее просто выполняются швы в нижнем положении и наиболее трудно – в потолочном. Поэтому при конструировании сварных соединений необходимо стремиться обеспечивать возможность выполнения сварных швов в нижнем положении, особенно в условиях монтажа.

По внешнему виду сварные швы разделяют на **выпуклые** (усиленные), **нормальные** и **вогнутые** (рис. 25, 26).

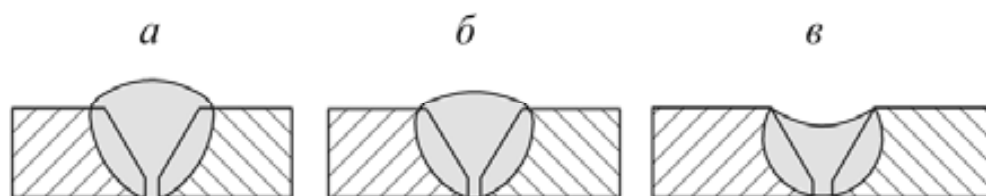


Рис. 25. Форма сварных стыковых швов: *а* – выпуклый сварной шов; *б* – нормальный шов; *в* – вогнутый

Обычно при ручной сварке применяют выпуклые (усиленные) швы. Выпуклые сварные швы лучше работают при статических (постоянных) нагрузках, однако они неэкономичны. Нормальные и вогнутые швы лучше подходят при динамических и знакопеременных нагрузках, поскольку за счет более плавного перехода от основного металла к сварному шву снижается вероятность возникновения концентрации напряжений, приводящих к разрушению шва. Вогнутость достигается регулировкой режима сварки или специальной механической обработкой. Стыковые швы вогнутыми не делают; вогнутость в стыковых швах является браковочным признаком.

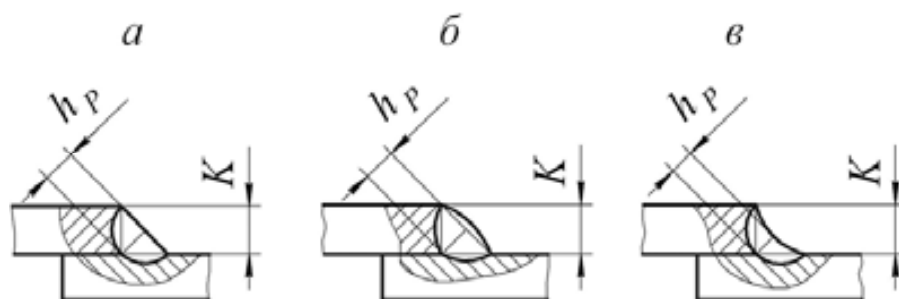


Рис.26. Форма угловых сварных швов: *а* – нормальный шов; *б* – выпуклый; *в* – вогнутый;  $hP$  – расчетная высота шва;  $K$  – катет шва

По направлению действующего усилия различают:

1. Стыковые швы:

- **прямые** (рис. 27*а*);
- **косые** (рис.27*б*).

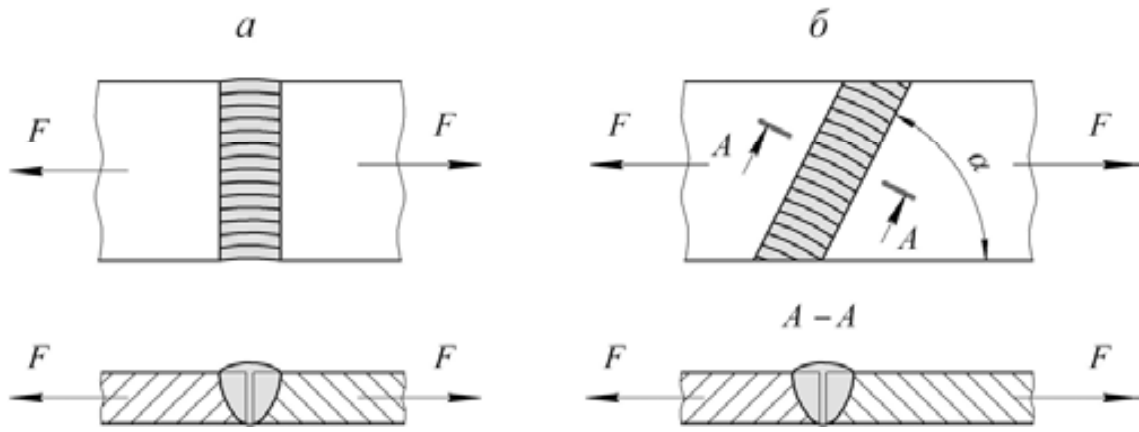


Рис. 27. Типы стыковых швов по расположению: *a* – прямой стыковой шов; *б* – косой стыковой шов;  $\alpha = 45 - 60^\circ$ ; *F* – действующее на соединение усилие

2. Угловые швы:

- **поперечные** (лобовые) – направление действующего усилия перпендикулярно оси сварного шва (рис.28*a*);
- **продольные** (фланговые) – направление действующего усилия параллельно оси сварного шва (рис.28*б*);
- **косые** – направление действующего усилия размещено под углом к оси сварного шва (рис.28*в*);
- **комбинированные** – сочетание продольного и поперечного швов (рис.28*г*).

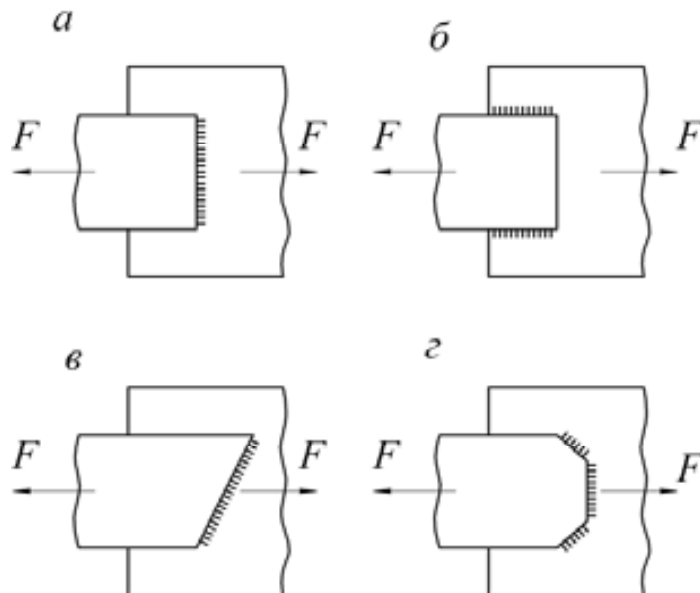


Рис.28. Типы угловых швов по расположению: *a* – лобовой шов; *б* – фланговые швы; *в* – косой шов; *г* – комбинированный шов; *F* – действующее на соединение усилие



Основными геометрическими параметрами стыкового шва (рис.29) являются (ГОСТ 2601 – 84):

- $S$  – толщина свариваемого металла;
- $e$  – ширина сварного шва;
- $g$  – выпуклость стыкового шва – наибольшая высота (глубина) между поверхностью сварного шва и уровнем расположения поверхности сваренных деталей;
- $h$  – глубина провара (глубина проплавления) – наибольшая глубина расплавления основного металла;
- $t$  – толщина шва,  $t = g+h$ ;
- $b$  – зазор.
- Коэффициент формы шва – отношение ширины шва к его толщине

$$K_n = e / t .$$

Значение коэффициента формы шва обычно  $0,5 \div 4$ . Оптимальным считается значение от 1,2 до 2.

- Коэффициент выпуклости шва – отношение ширины шва к его выпуклости

$$K_y = e / g .$$

Значение коэффициента выпуклости шва не должно быть более  $7 \div 10$ .

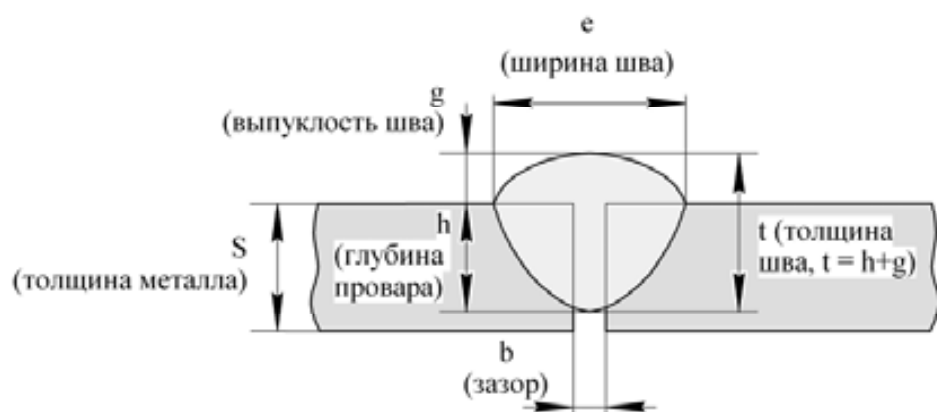


Рис. 29. Основные геометрические параметры стыкового шва

Основными геометрическими параметрами углового шва (рис.30) являются:

- $K$  – катет углового шва – кратчайшее расстояние от поверхности одной из свариваемых деталей до границы углового шва на поверхности второй свариваемой детали;
- $g$  – выпуклость шва;
- $h_p$  – расчетная высота углового шва – длина перпендикулярной линии, проведенной из точки наибольшего проплавления в месте сопряжения

- свариваемых частей к гипотенузе наибольшего прямоугольного треугольника, вписанного во внешнюю часть углового шва;
- $a$  – толщина углового шва,  $a = g + p$ .

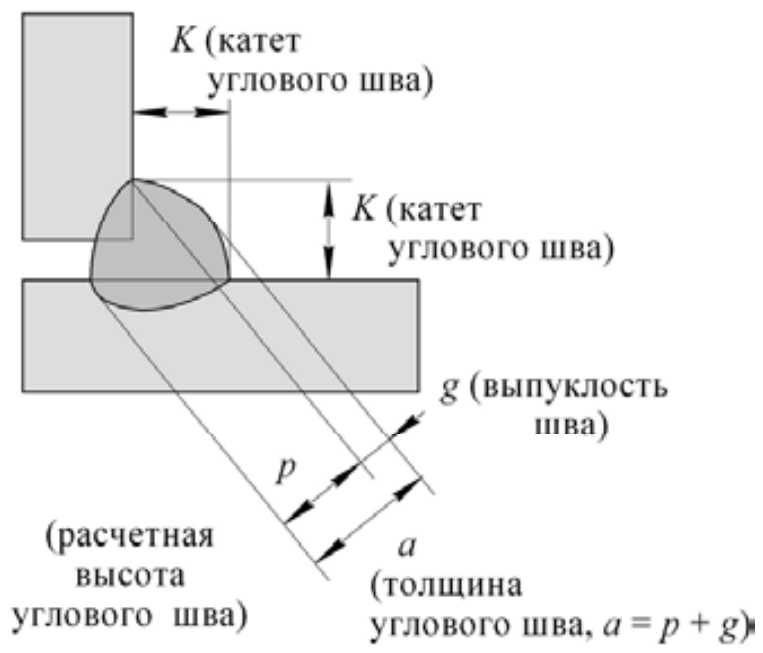


Рис. 30. Основные геометрические параметры углового шва

Состав шва определяется долями участия основного и наплавленного металлов в металле шва, зависящими от режима сварки, характера подготовки кромок и изменений, происходящих в составе шва при взаимодействии электродного металла и металла сварочной ванны с газами и шлаком. На рис.31 показано поперечное сечение стыкового шва общей площадью  $F$ , равной сумме площади сечения шва, сформированного за счет расплавления основного металла  $F_0$ , и площади сечения наплавленного (электродного) металла  $F_э$ .

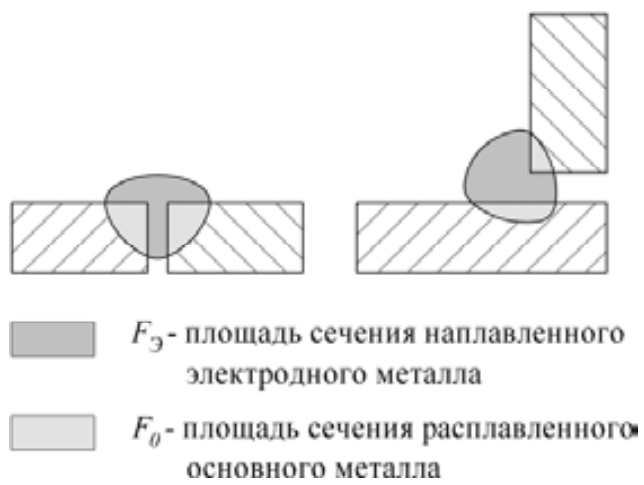


Рис. 31. К определению коэффициента долей основного металла в металле шва

Важной характеристикой для стыковых и угловых швов является коэффициент доли основного металла в металле шва

$$K_0 = \frac{F_0}{F_0 + F_Э}$$

При изменении доли основного металла в металле шва изменяется состав шва, а, следовательно, изменяются его механические, коррозионные и другие свойства.

Торцовые поверхности деталей, подлежащие нагреву и расплавлению при сварке, называют свариваемыми кромками. Для обеспечения равномерного проплавления свариваемых кромок, в зависимости от толщины основного металла и способа сварки, им придают оптимальную форму, выполняя предварительно подготовку кромок. Форма подготовки кромок зависит от толщины свариваемого металла и способа сварки.

Обработку кромок для сварных соединений производят путем автоматической или полуавтоматической газовой резки и механической резки на строгальных и фрезерных станках. В случае газовой резки кромки перед сваркой тщательно зачищают от окалины и шлака при помощи пескоструйных аппаратов или другими средствами.

Элементами геометрической формы подготовки кромок под сварку являются: угол разделки кромок  $\alpha$ ; угол скоса кромки  $\beta$ ; зазор между стыкуемыми кромками  $b$ ; притупление кромок  $c$  (рис. 32); длина скоса листа при наличии разности толщин  $L$ ; смещение кромок относительно друг друга  $\Delta$  (рис.33).

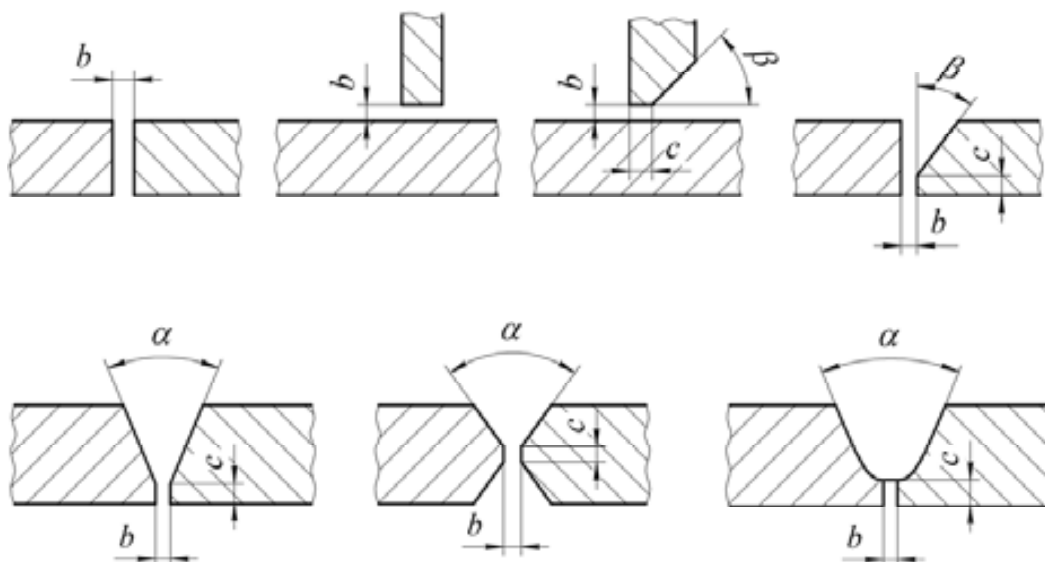


Рис.32. Геометрические параметры подготовки кромок свариваемых элементов



Рис. 33. Подготовка кромок при соединении листов разной толщины

Угол разделки кромок  $\alpha = (45^\circ \div 90^\circ)$  выполняется при толщине металла более 3 мм, поскольку его отсутствие (разделки кромок) может привести к непровару по сечению сварного соединения, а также к перегреву и пережогу металла; при отсутствии разделки кромок для обеспечения провара электро-сварщик всегда старается увеличить величину сварочного тока. Разделка кромок позволяет вести сварку отдельными слоями небольшого сечения, что улучшает структуру сварного соединения и уменьшает возникновение сварочных напряжений и деформации.

Угол скоса кромок  $\beta$  обеспечивает определенный угол разделки соединения, что необходимо для доступа электрода и дуги вглубь соединения и полного проплавления кромок на всю их толщину. Стандартный угол скоса кромок в зависимости от способа сварки и типа соединения меняется в пределах от 20 до 60°.

Зазор  $b$ , правильно установленный перед сваркой, позволяет обеспечить полный провар по сечению соединения при наложении первого (корневого) слоя шва, если подобран соответствующий режим сварки. Принимают обычно  $b=1 \dots 4$  мм в зависимости от толщины металла.

Притупление кромок  $c$  выполняется для обеспечения устойчивого ведения процесса сварки при выполнении корневого шва. Отсутствие притупления способствует образованию прожогов при сварке  $c=1..3$  мм в зависимости от свариваемого материала.

Смещение кромок  $\Delta$  ухудшает прочностные свойства сварного соединения и способствует образованию непровара и концентраций напряжении.

Длиной скоса листа  $L$ ,  $L_1$  регулируется плавный переход от толстой свариваемой детали к более тонкой, устраняются концентраторы напряжений в сварных конструкциях. Длина  $L$  – одностороннего скоса кромок определяется по формуле

$$L=5(S_1 - S)+6,$$

а длина  $L_1$  – двустороннего – по формуле

$$L_1=2,5(S_1 - S)+3.$$

По форме разделки кромок свариваемых элементов стыковые швы подразделяются на (рис.34): без разделки; V – образные; U – образные; X – образные.

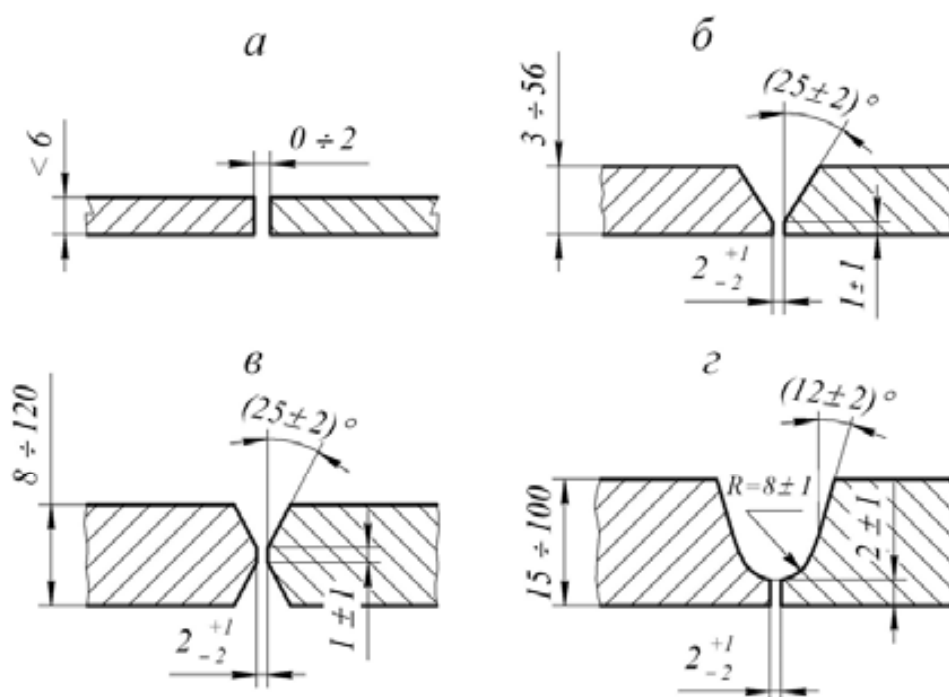


Рис. 34. Стыковое соединение, разделка кромок: *а* – без разделки; *б* – V - образная разделка; *в* – X – образная разделка; *г* – U – образная разделка

При ручной сварке без разделки кромок можно проварить листы не толще 5 мм, при автоматической и полуавтоматической – до 22 мм. При бóльшей толщине (до 30 мм), автоматической и полуавтоматической сварке и невозможности кантовки делают V-образную разделку кромок, шов в этом случае варится сверху. При возможности кантовки и толщине до 60 мм применяют X-образную разделку. При толщине до 100 мм и невозможности кантовки применяют U-образную разделку кромок.

Угол между гранями V- и X-образного швов 45 – 50°. При одинаковой толщине соединяемых листов двусторонний шов X-образный оказывается

примерно вдвое меньшим по площади, чем односторонний V-образный. Это делает первый лучшим по энергоёмкости, обеспечивающим лучшую работу стыка за счёт симметрии, а также не нужна подварка корня шва. Поэтому применение двустороннего шва предпочтительнее.

Типы сварных швов, в зависимости от вида соединения, формы подготовленных кромок и характера выполнения приведены в соответствующих ГОСТах. Например, согласно ГОСТ 5264-80, швы стыковых соединений разделяются на 32 типа, условно обозначенных от С1 до С45.

Тавровые соединения также применяют как без скоса кромок (рис.35а), так и с односторонней (рис.35б) или двусторонней (рис.35в) разделкой. При толщине металла менее 10 мм при ручной дуговой сварке применяют одностороннюю, а при большей толщине – одностороннюю или двустороннюю разделку. Соединения без скоса кромок на стали любой толщины применяют в конструкциях с малой статической нагрузкой.

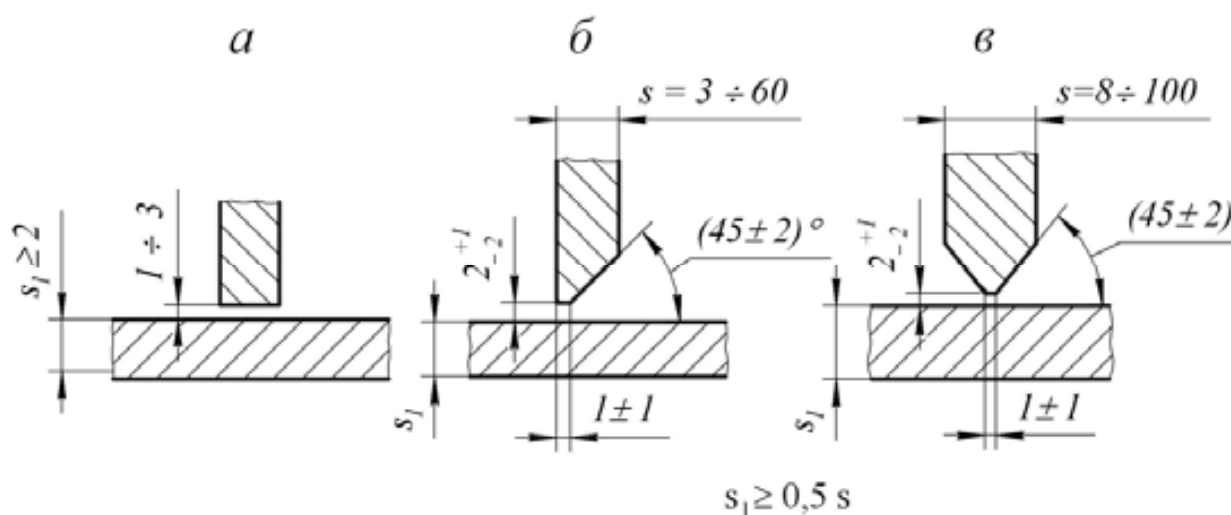




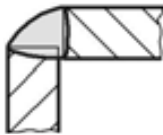
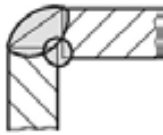




Рис.35. Разделка кромок в тавровых соединениях



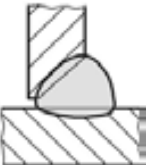
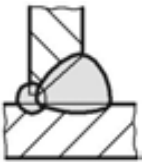


Некоторые типы швов, выполняемых ручной дуговой сваркой приведены в табл.4 и 5.

Таблица 4

Основные типы швов сварных соединений без скоса кромок  
(ГОСТ 5264-80)

Вид соединения	Односторонний			Двусторонний		
	условное обозн. шва	поперечное сечение шва	толщина листов, мм	условное обозн. шва	поперечное сечение шва	толщина листов, мм
Стыковое	C2		1 – 4	C7		2 – 5
Тавровое	T1		2 – 40	T3		2 – 40
Угловое	У4		1 – 30	У5		2 – 30
Нахлесточное	H1		2 – 60	H2		2 – 60

Основные типы швов сварных соединений со скосом кромок  
(ГОСТ 5264-80)

Вид соединения	Односторонний			Двусторонний		
	условное обозн. шва	поперечное сечение шва	толщина листов, мм	условное обозн. шва	поперечное сечение шва	толщина листов, мм
Стыковое	С8		3 – 60	С12		3 – 60
Тавровое	Т6			Т7		
Угловое	У6			У7		

При выполнении соединений могут возникать пороки шва (некачественные участки): в начале движения электрода — непровар, на конце шва при отрыве электрода — кратер (рис. 36). **Непровар** - местное отсутствие сплавления между свариваемыми элементами, между основным и наплавленным металлом или отдельными слоями шва при многослойной сварке. В результате непровара уменьшается сечение шва, и возникает местная концентрация напряжений, что в конечном итоге снижает прочность сварного соединения. При вибрационных нагрузках даже мелкие непровары могут снижать прочность соединения до 40 %. Большие непровары корня шва могут снизить прочность до 70 %.

**Кратеры** получаются в результате небрежного и неумелого выполнения сварки. В месте кратера толщина шва резко уменьшается, что вызывает понижение прочности сварного соединения. При действии динамической нагрузки разрушение шва почти всегда начинается с кратера, поэтому кратер необходимо обязательно заделывать.



Для устранения этих недостатков швы начинают и заканчивают на технологических планках, при этом расчетная длина шва принимается равной длине соединяемых элементов. Технологические планки после выполнения шва обрубается, а шов шлифуется.

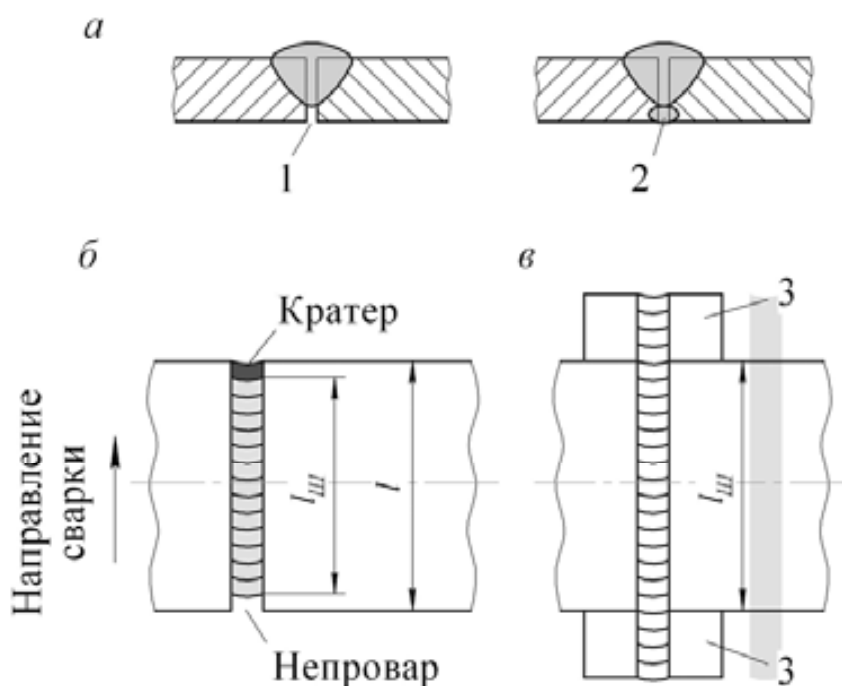


Рис. 36. Выполнение сварных соединений: *а* – подварка корня шва; *б* – образование непровара и кратера шва; *в* – выполнение шва на технологических планках; 1 — непровар корня шва; 2 — подварка корня шва; 3 — технологические планки;  $l$  – длина шва;  $l_{ш}$  – расчетная длина шва

Наличие участков шва низкого качества учитывается в расчетах уменьшением длины шва по сравнению с длиной соединяемых элементов. В стыковых швах длина шва уменьшается на две толщины соединяемых элементов, в угловых швах — на 10 мм.

Стыковые швы без скоса кромок, в зависимости от толщины, сваривают с одной или двух сторон. Если с обратной стороны возможен подход к корню шва и допустимо усиление обратной стороны шва, целесообразна подварка корня швом небольшого сечения с последующей укладкой основного шва. При сварке элементов толщиной более 8 мм для проплавления металла по всей толщине сечения необходимы зазоры и обработка кромок свариваемых элементов.

Для V- и U-образных швов, свариваемых с одной стороны, для устранения возможных непроваров, являющихся источником концентрации напряжений, обязательна подварка корня шва с другой стороны.

## 6. ОФОРМЛЕНИЕ ЧЕРТЕЖЕЙ СВАРНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Чертежи сварных изделий оформляют как чертежи сборочных единиц, т. е. выполняют сборочный чертеж и спецификацию в соответствии с ЕСКД. Условные обозначения швов сварных соединений выполняют по ГОСТ 2.312–72. Шов сварного соединения, независимо от способа сварки, условно изображают:

видимый – сплошной основной линией (рис. 37а, в);

невидимый – штриховой линией (рис. 37г);

Видимую одиночную сварную точку, независимо от способа сварки, условно изображают знаком "+" (рис.37б), который выполняют сплошными линиями (рис.38). Невидимые одиночные точки не изображают.

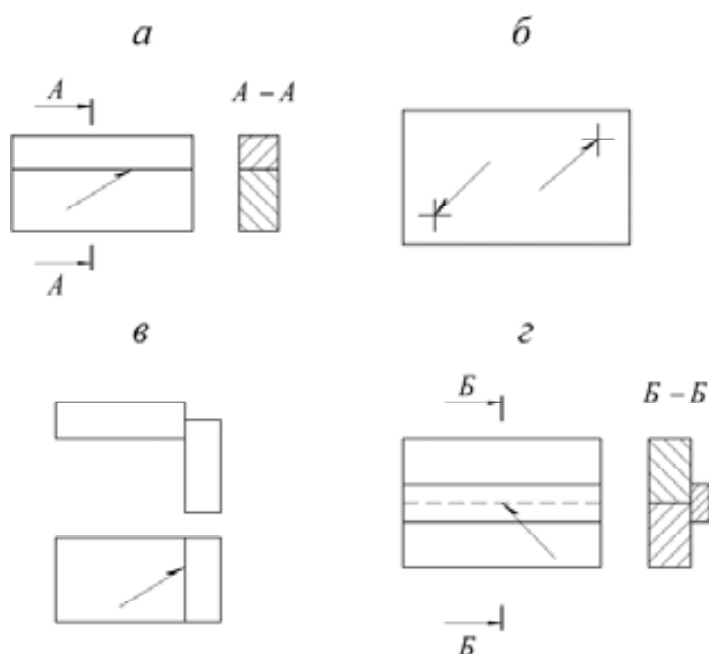


Рис. 37. Условное изображение сварного соединения

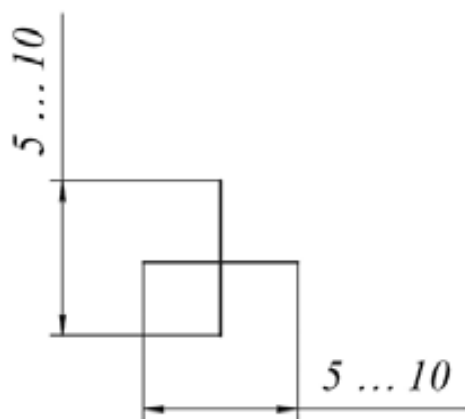


Рис. 38. Условное изображение одиночной сварной точки

От изображения сварного шва проводят линию–выноску, заканчивающуюся односторонней стрелкой.

Линию-выноску предпочтительно проводить от изображения видимого шва, с его лицевой стороны, с которой производят сварку основного шва.

Условное обозначение шва наносят:

а) на полке линии-выноски, проведенной от изображения шва с лицевой стороны (рис. 39а);

б) под полкой линии-выноски, проведенной от изображения шва с оборотной стороны (рис. 39б).

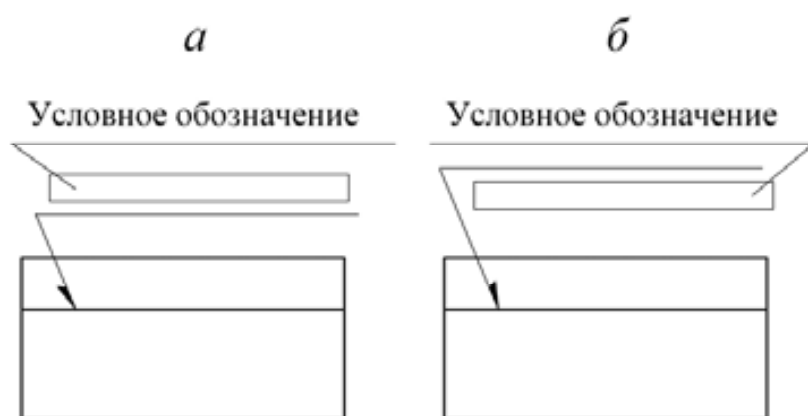


Рис. 39. Условное обозначение сварного шва: *а* – с лицевой стороны; *б* – с оборотной стороны


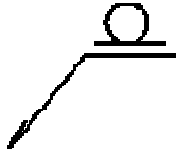





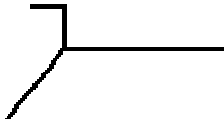

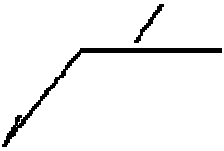
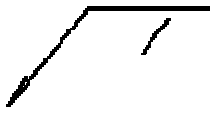

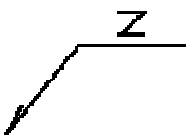
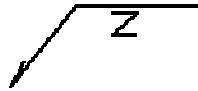




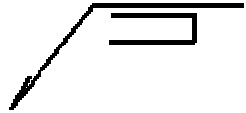
Вспомогательные знаки, входящие в обозначение шва, выполняют сплошными тонкими линиями, а высота знаков равна высоте цифр и букв, входящих в обозначение. Условные обозначения стандартного сварного шва включают (рис.40):

- вспомогательные знаки шва по замкнутой линии и монтажного шва;
- обозначение стандарта на типы и конструктивные элементы швов сварных соединений;
- буквенно-цифровое обозначение шва по стандарту;
- условное обозначение способа сварки по стандарту.

Вспомогательные знаки для обозначения сварных швов приведены в табл. 6.

Знак в виде прямоугольного треугольника  $\Delta$  и размер катета шва для угловых, тавровых и соединений внахлестку выполняют сплошными тонкими линиями. Высота знака должна быть одинаковой с высотой цифр, входящих в обозначение шва.

Вспомогательные знаки для обозначения сварных швов

Вспомогательный знак	Значение вспомогательного знака	Расположение вспомогательного знака относительно полки линии-выноски, проведенной от изображения шва	
		с лицевой стороны	с оборотной стороны
	Усиление шва снять		
	Наплывы и неровности обработать с плавным переходом к основному металлу		
	Шов выполнить при монтаже изделия, т.е. при установке его по монтажному чертежу на месте применения		
	Шов прерывистый или точечный с цепным расположением. Угол наклона линии ~60°		
	Шов прерывистый или точечный с шахматным расположением		
	Шов по замкнутой линии Диаметр знака - 3...5 мм.		
	Шов по незамкнутой линии. Знак применяют, если расположение шва ясно из чертежа		

## Примечания.

1. За лицевую сторону одностороннего шва сварного соединения принимают сторону, с которой производят сварку.

2. За лицевую сторону двустороннего шва сварного соединения с несимметрично подготовленными кромками принимают сторону, с которой производят сварку основного шва.
3. За лицевую сторону двустороннего шва сварного соединения с симметрично подготовленными кромками может быть принята любая сторона.

Для прерывистого шва указывают в мм длину провариваемого участка и шаг. Их значения разделяют наклонной линией под углом  $60^\circ$  в случае цепного расположения швов или специальным знаком *Z* для шахматного расположения.

Буквенно-цифровое обозначение типа шва содержит букву типа соединения: *C, T, H, У*. После буквы в обязательном порядке должна быть поставлена цифра (порядковый номер шва в стандарте), указывающая конструктивные элементы подготовки свариваемых кромок и конкретные условия выполнения сварного соединения.

Условное буквенное обозначение способа сварки по соответствующему стандарту на чертежах допускается не указывать, когда по стандарту понятно, что за способ сварки при этом используется. Приняты следующие обозначения способов сварки: *AΦ* — автоматическая под флюсом на весу, *AΦφ* — автоматическая под флюсом на флюсовой подушке, *AΦo* — автоматическая под флюсом на остающейся подкладке, *AΦм* — автоматическая под флюсом на медной подкладке, *ПΦ* — полуавтоматическая под флюсом на весу, *ПΦк* — то же, с предварительной подваркой корня шва и т.д. Ручная дуговая сварка не имеет буквенного обозначения.

На рис.41 приведена структура условного обозначения нестандартного сварного шва.

Обозначение шероховатости механически обработанной поверхности шва наносят на полке или под полкой линии-выноски после условного обозначения шва (рис. 42), или указывают в таблице швов, или приводят в технических требованиях чертежа, например: "Параметр шероховатости поверхности сварных швов ...".

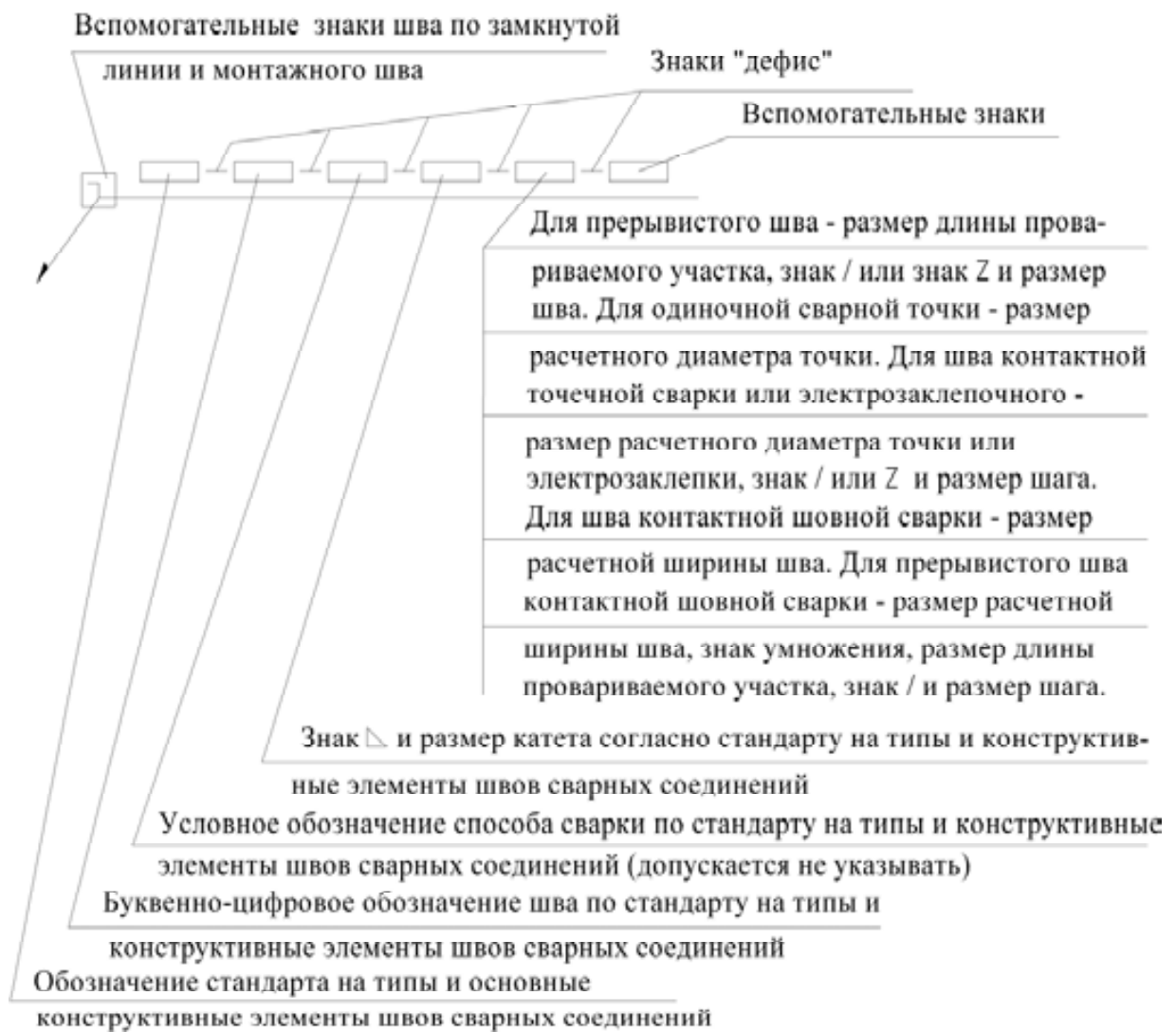


Рис. 40. Структура обозначения стандартного сварного шва

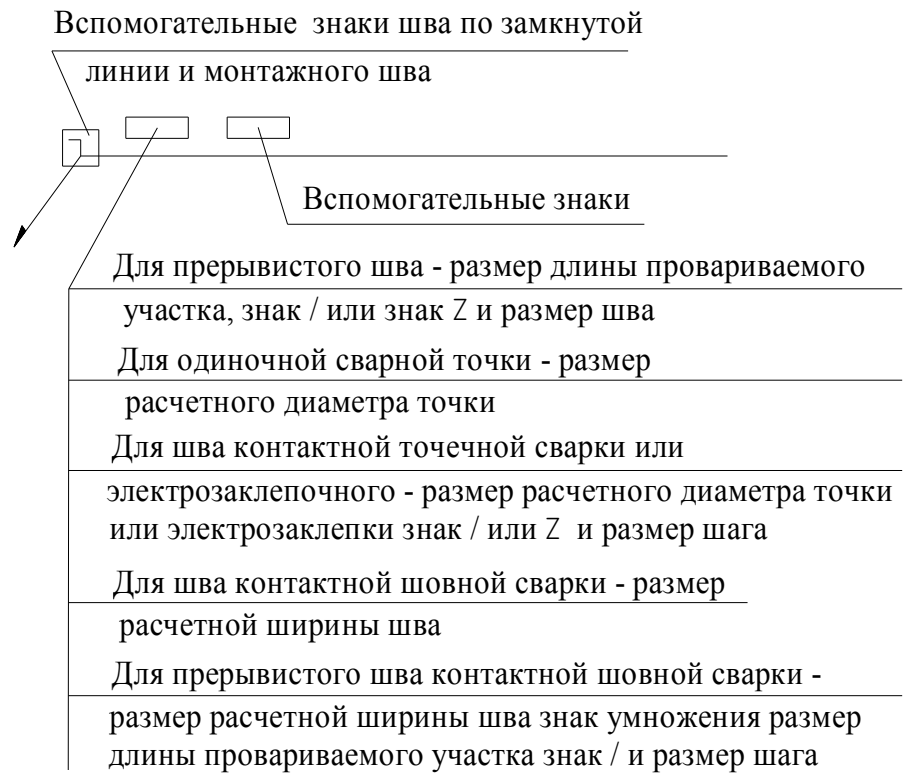


Рис.41. Структура обозначения нестандартного шва или одиночной точки

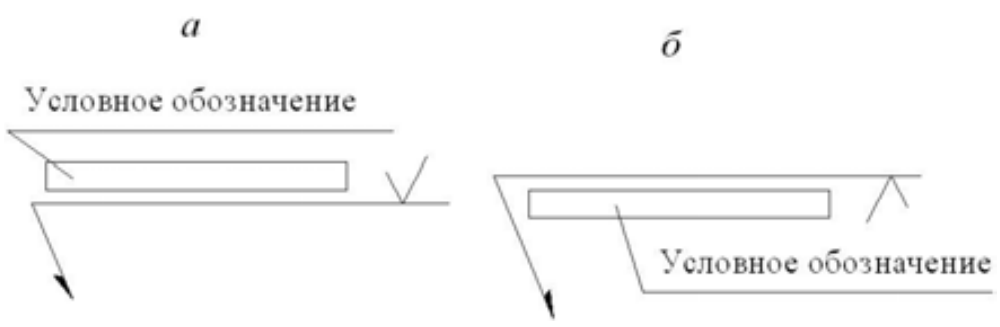


Рис.42. Обозначение шероховатости механически обработанной поверхности шва: а – с лицевой стороны; б – с оборотной стороны

При наличии на чертеже одинаковых швов обозначение наносится у одного из изображений, от изображений остальных одинаковых швов проводят линии-выноски с полками. Всем одинаковым швам присваивают одинаковый номер, который наносят:

- а) на линии-выноске, имеющей полку с нанесенным обозначением шва (рис.43а);

б) на полке линии-выноски, проведенной от изображения шва, не имеющего обозначения, с лицевой стороны (рис. 43б);

в) под полкой линии-выноски, проведенной от изображения шва, не имеющего обозначения, с оборотной стороны (рис. 43в);

Количество одинаковых швов допускается указывать на линии-выноске, имеющей полку с нанесенным обозначением шва (см. рис. 43а).

Швы считаются одинаковыми, если: одинаковы их типы и размеры конструктивных элементов в поперечном сечении; к ним предъявляются одни и те же требования.

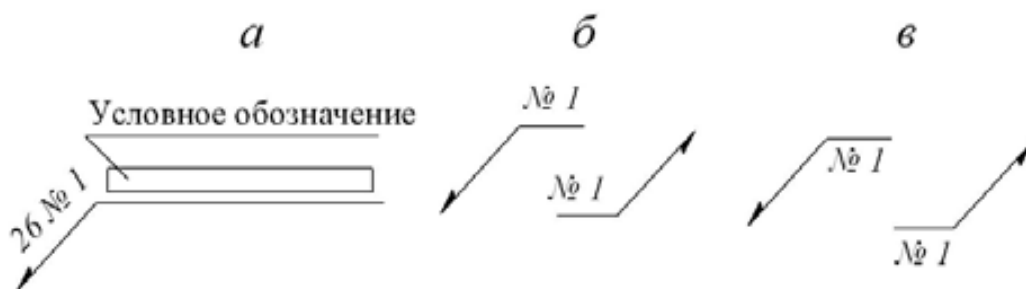


Рис. 43. Обозначение одинаковых швов

При наличии на чертеже швов, выполненных по одному и тому же стандарту, обозначение стандарта указывают в технических требованиях чертежа (запись по типу: "Сварные швы ... по ...") или таблице.

Допускается не присваивать порядковый номер одинаковым швам, если все швы на чертеже одинаковы и изображены с одной стороны (лицевой или обратной). При этом швы, не имеющие обозначения, отмечают линиями-выносками без полок (рис.44).



Рис. 44. Обозначение швов с помощью линий-выносок

На чертеже симметричного изделия, при наличии на изображении оси симметрии, допускается отмечать линиями-выносками и изображать швы только на одной из симметричных частей изображения изделия.

На чертеже изделия, в котором имеются одинаковые составные части, привариваемые одинаковыми швами, эти швы допускается отмечать линиями-выносками и обозначать только у одного из изображений одинаковых



частей (предпочтительно у изображения, от которого проведена линия-выноска с номером позиции).

Допускается не отмечать на чертеже швы линиями-выносками, а приводить указания о сварке записью в технических требованиях чертежа, если эта запись однозначно определяет места сварки, способы сварки, типы швов сварных соединений, размеры их конструктивных элементов в поперечном сечении и расположение швов.

На изображение сечения многопроходного шва допускается наносить контуры отдельных проходов, при этом их необходимо обозначить прописными буквами русского алфавита (рис.45).

Шов, размеры конструктивных элементов которого стандартами не установлены (нестандартный шов), изображается с указанием размеров конструктивных элементов, необходимых для выполнения шва по данному чертежу (рис.46).

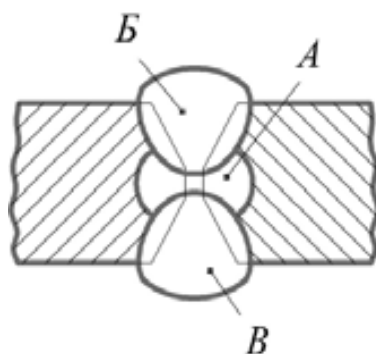


Рис. 45. Изображение многопроходного шва

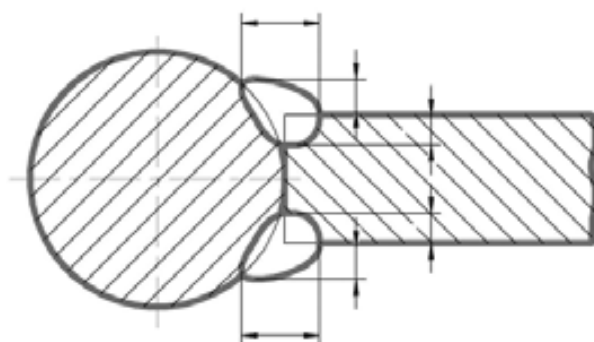


Рис. 46. Изображение нестандартного шва

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

Одинаковые требования ко всем швам или группе швов приводят один раз – в технических требованиях или таблице швов.

Марку электрода или присадочного материала с указанием стандарта указывают в технических требованиях чертежа.

## 7. РАСЧЕТЫ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ПРОЧНОСТЬ

Прочность сварных соединений зависит от: прочности основного металла соединяемых элементов, прочности наплавленного металла шва, формы и вида соединения и связанного с этим распределения напряжений в соединении, характера силового воздействия на соединение, технологии сварки.

Правильный выбор сварочных материалов (электродов, электродной проволоки, флюса) и технологического процесса обеспечивает получение прочностных характеристик металла соединения не ниже характеристик основного металла. Однако при некачественном выполнении шва в нем могут оказаться поры, газовые и шлаковые включения и прочие внутренние дефекты, которые являются внутренними источниками концентрации напряжений и будут ослаблять шов при его работе на растяжение. Поэтому стыковой шов, работающий на растяжение, принимается равнопрочным основному металлу только в том случае, если он будет надежно проверен одним из физических методов контроля (просвечивание рентгеновскими или гамма-лучами, проверка ультразвуком) и признан годным к эксплуатации. На стыковые швы, работающие на сжатие или срез, влияние возможных внутренних источников концентрации напряжений (газовые и шлаковые включения, поры и т. п.) оказывается меньшим, а потому применение физических методов контроля для них не является обязательным. Это позволяет принимать для таких швов расчетные сопротивления равными сопротивлению основного металла.

Угловые швы (лобовые и фланговые) всегда испытывают совокупность воздействий осевой силы, изгиба и среза, имеют значительную концентрацию напряжений, и их расчет носит условный характер.

Все принятые в инженерной практике методы расчета сварных соединений являются приближенными, дающими возможность получить решение с меньшей затратой времени. Наиболее трудной и ответственной частью расчета является правильный выбор допускаемых напряжений или запасов прочности с учетом всех особенностей рассчитываемой конструкции, технологии ее изготовления и условий эксплуатации.

Допускаемые напряжения в сварных швах при статической нагрузке определяют в зависимости от допускаемых напряжений на растяжение  $[\sigma]_P$  для основного металла:

– при растяжении

$$[\sigma]_P = \sigma_T / [n]; \quad (1)$$

где  $[n]$  - коэффициент запаса прочности, принимаемый обычно равным 1,4-1,6, к допускаемым напряжениям на основной металл;

– при сжатии

$$[\sigma]_{СЖ} = [\sigma]_P; \quad (2)$$

– при срезе

$$[\tau] = (0,5 - 0,6)[\sigma]_P. \quad (3)$$

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

К первой группе относятся швы низкоуглеродистых сталей обычного качества и низколегированных, у которых механические свойства швов и зоны термического влияния соответствуют свойствам основного металла. Рекомендуемые допускаемые напряжения для швов этой группы приведены в табл. 7.

Таблица 7

### Допускаемые напряжения в сварных швах

Тип шва	Род усилия	Виды сварки		
		Ручная, электроды Э42, Э50		автоматическая, полуавтоматическая, электродами Э42А, Э50А
		без обработки	с подваркой корня	
Стыковые	Растяжение	0,8 $[\sigma]_P$	0,9 $[\sigma]_P$	1,0 $[\sigma]_P$
	Сжатие	0,9 $[\sigma]_P$	1,0 $[\sigma]_P$	1,0 $[\sigma]_P$
Стыковые и угловые	Срез	0,6 $[\sigma]_P$	0,65 $[\sigma]_P$	0,65 $[\sigma]_P$

Ко второй группе относятся швы сталей со специальными свойствами (высокопрочные, коррозионно-стойкие), у которых свойства швов или металла околошовной зоны хуже свойств основного металла. Для швов этой группы сталей допускаемые напряжения назначаются на основе специально проведенных экспериментов в условиях, соответствующих работе проектируемой сварной конструкции.

При стыковой контактной сварке, сварке трением и холодным способом в соединении возможно принятие допускаемых напряжений, как и для стыковых соединений, выполненных дуговыми способами сварки, если технологический процесс отработан и позволяет получить высокие механические свойства соединения.

Для соединений, выполненных точечной и шовной контактной сваркой, допускаемые напряжения среза для низкоуглеродистых и некоторых низколегированных сталей могут составлять: 0,5 $[\sigma]_P$  - при испытании на срез и 0,3 $[\sigma]_P$  - при испытании на отрыв.

При сварке низкоуглеродистой стали марки Ст3, для которой допускаемое напряжение  $[\sigma]_p = 160$  МПа, допускаемые напряжения в швах, выполненных автоматической сваркой и электродами Э42А, будут следующие:

$$[\sigma']_p = 160 \text{ МПа}; \quad [\sigma']_{сж} = 160 \text{ МПа}; \quad [\tau'] = 100 \text{ МПа}.$$

### 7.1. Расчет сварных соединений со стыковыми швами

Сварные соединения со стыковыми швами, воспринимающие продольные растягивающие или сжимающие силы выполняют прямыми или косыми.

Расчет таких соединений выполняется в следующей последовательности.

- 1) прямые швы (рис.47а, б)  
при растяжении

$$\sigma_{ш} = \frac{F}{A_{ш}} = \frac{F}{s \cdot l_{ш}} \leq [\sigma']_p; \quad (4)$$

при сжатии

$$\sigma_{ш} = \frac{F}{A_{ш}} = \frac{F}{s \cdot l_{ш}} \leq [\sigma']_{сж}; \quad (5)$$

при изгибе

$$\sigma_{ш} = \frac{M}{W_{ш}} = \frac{6 M}{s \cdot l_{ш}^2} \leq [\sigma']_p; \quad (6)$$

при срезе

$$\tau_{ш} = \frac{Q \cdot S_{ш}}{l_{ш} \cdot s} \leq [\tau']. \quad (7)$$

- 2) косые швы (рис.47в)

$$\sigma_{э} = \sqrt{\sigma_{ш}^2 + 3\tau_{ш}^2} \leq [\sigma']_p, \quad (8)$$

где

$$\sigma_{ш} = \frac{F \cdot \sin \alpha}{s \cdot l_{ш}}; \quad \tau_{ш} = \frac{F \cdot \cos \alpha}{s \cdot l_{ш}}.$$

В приведенных формулах (4) – (8) приняты следующие обозначения:  
 $A_{ш}$ ,  $W_{ш}$ ,  $I_{ш}$  – соответственно, площадь, осевой момент сопротивления и осевой момент инерции площади сечения сварного шва;  
 $Q$  – поперечная сила;

$S_{ш}$  – статический момент относительно нейтральной оси части сечения сварного шва, расположенной выше уровня рассматриваемых волокон;  
 $l_{ш}$  и  $s$  – соответственно расчетная длина и толщина шва;  
 $\alpha$  - угол между направлением продольной силы и осью косого шва.

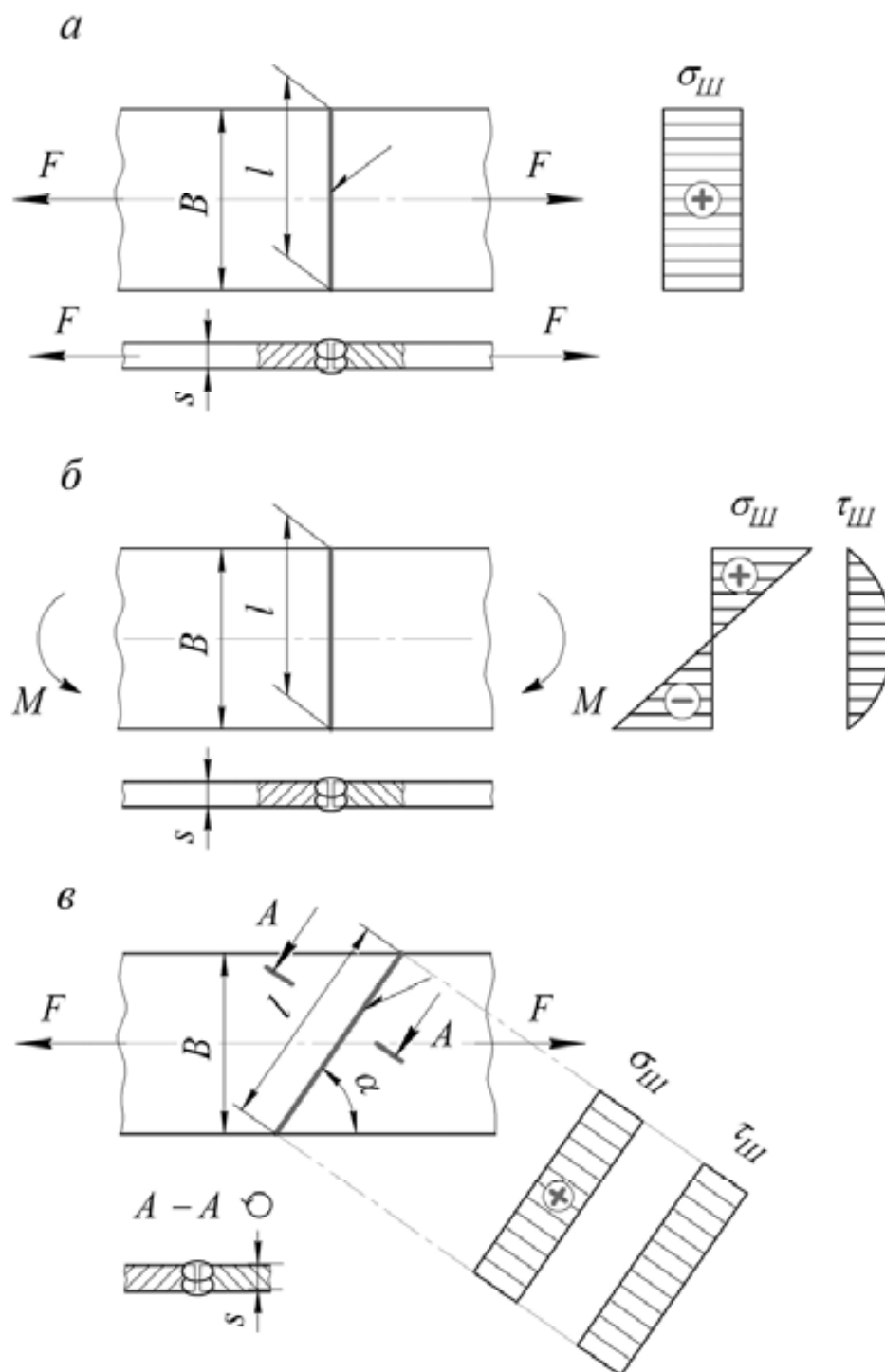


Рис.47.К расчету стыковых сварных соединений

Расчетная длина шва  $l_{ш}$  принимается равной фактической  $l$ , если концы шва выведены на выводные планки. Если шов не выведен на выводные

планки, то его расчетная длина уменьшается на 10 мм, т.е.  $l_{III} = l - 10$ . Расчетная толщина шва  $s$  принимается равной толщине основного металла, если шов выполнен с полным проваром. Если же шов заварен не на всю толщину, то  $s$  берется равной истинной толщине шва.

## 7.2. Расчет соединений с угловыми швами

Угловыми швами выполняются нахлесточные, тавровые и угловые соединения. Практика показывает, что разрушение угловых швов происходит по сечению, совпадающему с биссекторным сечением шва (рис.48).

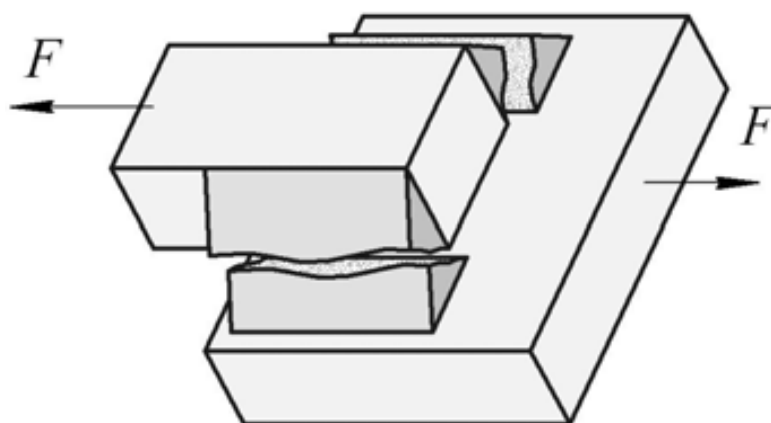


Рис.48. Разрушение угловых швов

Поэтому расчет прочности швов производится по опасной плоскости шва, совпадающей с биссектрисой прямого угла. Расчетная площадь углового шва  $F_{III}$  определяется по формуле  $F_{III} = h_p \cdot l_{III}$ , где  $h_p = \beta \cdot K$  - расчетная высота поперечного сечения углового шва;  $\beta$  - коэффициент для определения расчетной высоты углового шва;  $K$  - катет углового шва;  $l_{III}$  - расчетная длина шва.

В зависимости от формы поперечного сечения (нормального, выпуклого, вогнутого) и способа сварки, коэффициент  $\beta$  принимается равным:

для однослойной автоматической сварки	1,1
для однослойной механизированной и многослойной автоматической	0,9
для многослойной механизированной	0,8
для ручной	0,7.

Часто при расчетах прочности соединений с угловыми швами коэффициент  $\beta$  принимается равным 0,7, независимо от способа сварки. Это ведет к большому запасу прочности рассчитываемого соединения.

При расчете сварных соединений с угловыми швами необходимо учитывать следующие обстоятельства:

1. Размеры и форму сварных угловых швов следует принимать с учетом следующих условий:
  - а) катеты угловых швов должны быть не более  $1,2 s$ , где  $s$  - наименьшая толщина соединяемых деталей;
  - б) катеты угловых швов следует принимать по расчету на прочность, но не менее значений, указанных в табл.8.

Таблица 8

Минимальные значения катетов угловых швов

Вид соединения	Способ сварки	Предел текучести стали, МПа	Минимальные катеты швов $K$ , мм, при толщине более толстого из свариваемых элементов $s$ , мм						
			св.4 до 5	св.5 до 10	св.10 до 16	св.16 до 22	св.22 до 32	св.32 до 40	св.40 до 80
Тавровое с двусторонними угловыми швами, нахлесточное и угловое	Ручная	до 430	4	5	6	7	8	9	10
		св. 430 до 580	5	6	7	8	9	10	12
	Автоматическая и механизированная	до 430	3	4	5	6	7	8	9
		св. 430 до 580	4	5	6	7	8	9	10
Тавровое с односторонними угловыми швами	Ручная	до 380	5	6	7	8	9	10	12
	Автоматическая и механизированная		4	5	6	7	8	9	10

- в) расчетная длина углового шва должна быть не менее  $4K$  и не менее 40 мм;
  - г) расчетная длина флангового шва должна быть не более  $50K$ , за исключением швов, в которых усилие действует на всем протяжении шва;
  - д) размер нахлестки должен быть не менее 5 толщин наиболее тонкого из свариваемых элементов;
  - е) соотношение размеров катетов угловых швов следует принимать, как правило, 1: 1. При разных толщинах свариваемых элементов допускается принимать швы с неравными катетами; при этом катет, примыкающий к более тонкому элементу, должен соответствовать требованиям пункта 1а, а примыкающий к более толстому элементу – требованиям пункта 1б.
2. Применение односторонних угловых швов не допускается в конструкциях, испытывающих действие динамических и усталостных нагрузок и эксплуатируемых в среднеагрессивных и сильноагрессивных средах.

Расчетные формулы несущей способности угловых сварных швов составляются в предположении, что напряжения вдоль швов при действии продольных или поперечных сил распределены по длине швов равномерно.

В соответствии с этим условие прочности для соединения с двумя лобовыми швами (рис.49а) и с фланговыми швами (рис.49б) имеет вид

$$\tau = \frac{F}{2\beta \cdot K \cdot l_{ш} \cdot s} \leq [\tau'] \quad (9)$$

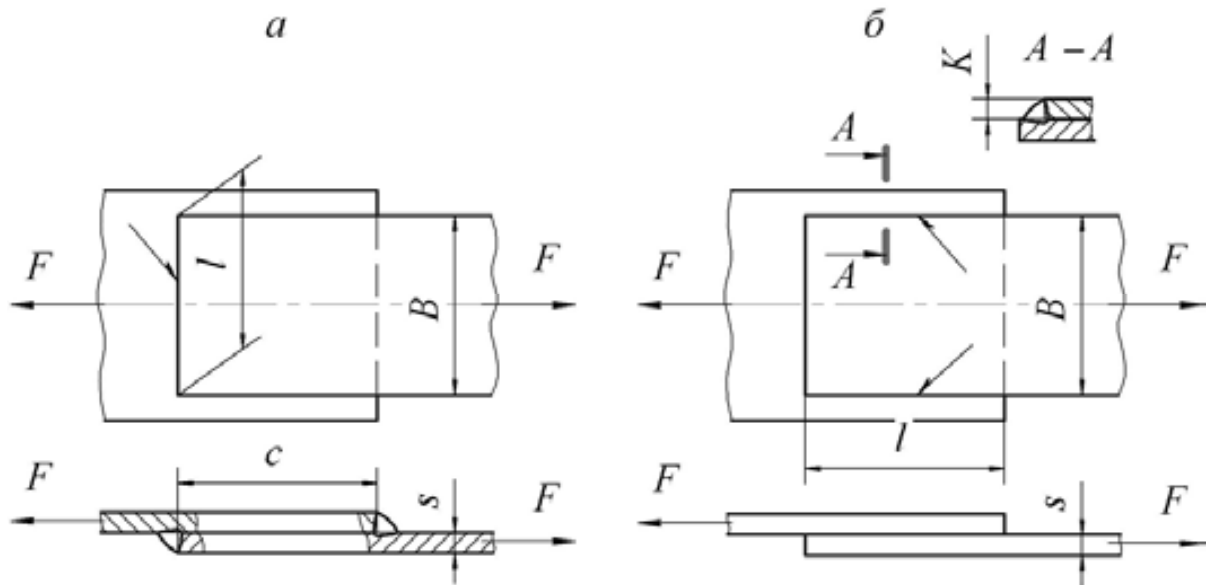


Рис. 49. К расчету соединений с угловыми швами

При использовании в соединении внахлестку комбинированных угловых швов равных катетов (рис.50) условие прочности имеет вид

$$\tau = \frac{F}{\beta \cdot K \cdot L} \leq [\tau'] \quad (10)$$

где  $L$  – общая длина швов, равная  $L = 2l_1 + 2l_2 + l_3$ .

Некоторую особенность представляет расчет прочности швов, прикрепляющих уголок, работающий под действием продольной силы (рис.51). Принимаем, что усилие  $F$  в уголке действует в плоскости прикрепленной полки. Так как центр тяжести сечения уголка находится не посередине ширины уголка, то шов, расположенный ближе к центру тяжести, воспринимает большую нагрузку, чем шов, расположенный дальше от центра тяжести.



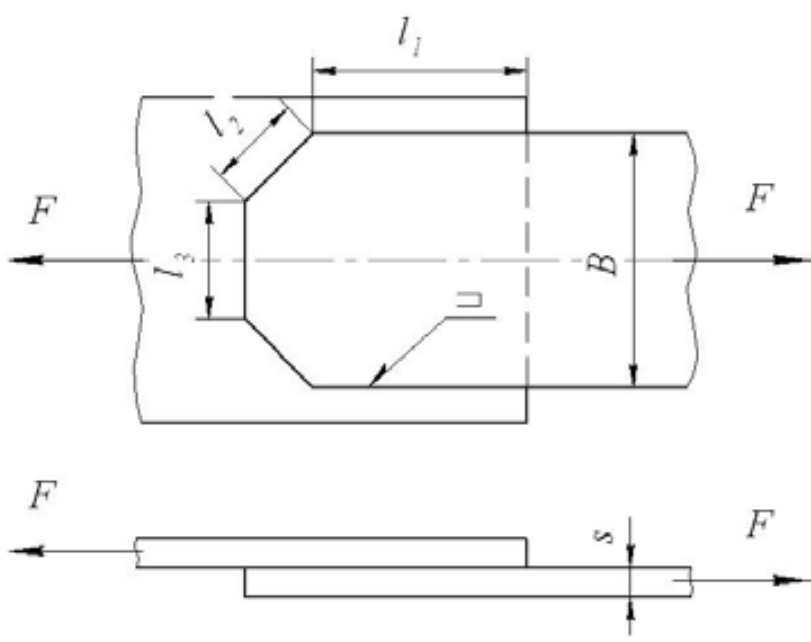


Рис. 50. Нахлесточное соединение с комбинированным угловым швом

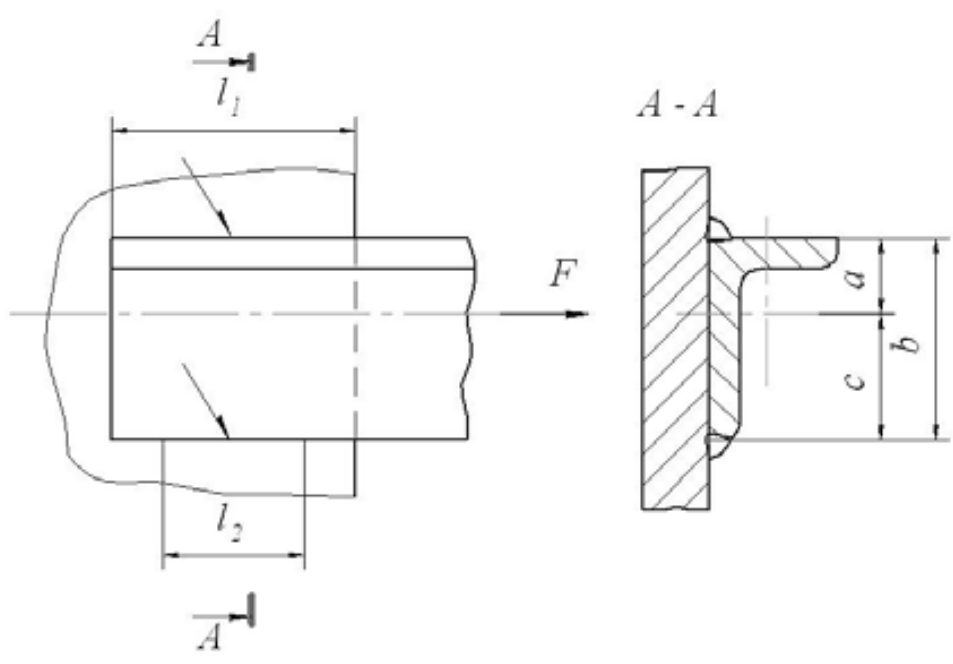


Рис. 51. Приварка неравнобокого уголка

Принимается, что усилие  $F$  распределяется между швами обратно пропорционально расстоянию от оси, проходящей через центр тяжести уголка до обеих кромок, т.е.

$$F_1 \cdot a = F_2 \cdot c; \quad F_1 + F_2 = F,$$

откуда

$$F_1 = F \cdot \frac{c}{b}; \quad F_2 = F \cdot \frac{a}{b}.$$

Таким образом, необходимые длины швов, обеспечивающие прочность соединения, будут равны

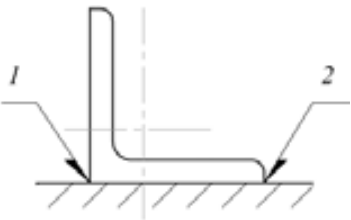
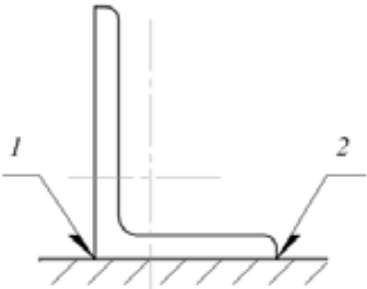
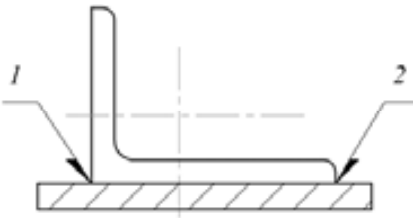
$$l_1 \geq \frac{F_1}{\beta \cdot K \cdot [\tau']}; \quad l_2 \geq \frac{F_2}{\beta \cdot K \cdot [\tau']}. \quad (11)$$

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

Значения величин  $c/b$  и  $a/b$  для разных уголков принимают по табл.9.

Таблица 9

К расчету швов, прикрепляющих уголок

Прикрепляемый элемент	Эскиз (1 – первый шов, 2 – второй шов)	$c/b$ для первого шва	$a/b$ для второго шва
Равнобокий уголок		0,7	0,3
Неравнобокий уголок, приваренный узкой полкой		0,75	0,25
Неравнобокий уголок, приваренный широкой полкой		0,65	0,35

При расчете сварных соединений с угловыми швами, воспринимающими изгибающий момент, необходимо рассмотреть два случая:

а) изгибающий момент воспринимается одним швом (рис.52);

б) изгибающий момент воспринимается двумя швами (рис.53).  
Условие прочности для первого случая записывается в виде

$$\tau_{ш} = \frac{M}{W_{ш}} \leq [\tau'], \quad (12)$$

где  $W_{ш}$  – осевой момент сопротивления площади сечения шва

$$W_{ш} = \frac{\beta \cdot K \cdot l_{ш}^2}{6}.$$

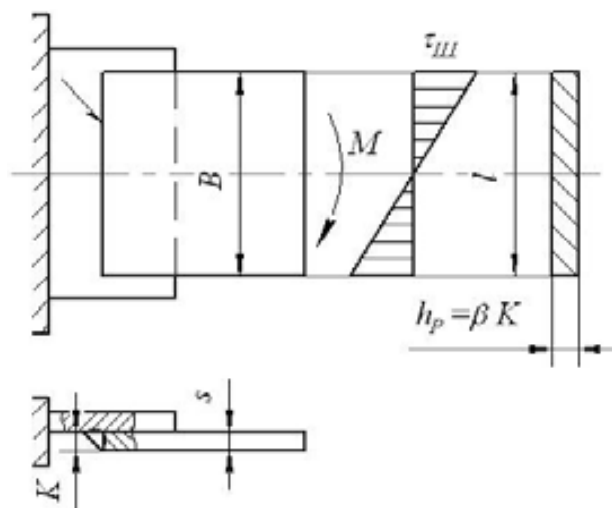


Рис. 52. Нахлесточное соединение с одним швом, нагруженное изгибающим моментом

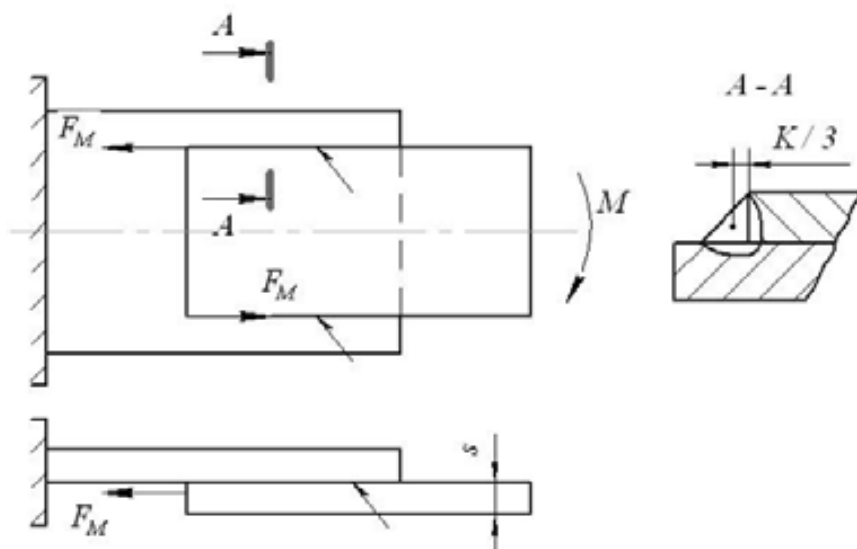


Рис. 53. Нахлесточное соединение с двумя швами, нагруженное изгибающим моментом

Для второго случая определяют силы, воспринимаемые швами,

$$F_M = \frac{M}{H},$$

где  $H = (B + 2K/3)$  – плечо реактивной пары, равное расстоянию между центрами тяжести сварных швов.

Прочность сварных швов проверяется по формуле

$$\tau_{ш} = \frac{F_M}{A_{ш}} = \frac{F_M}{\beta \cdot K \cdot l_{ш}} \leq [\tau'] . \quad (13)$$

В сварном шве, воспринимающем поперечную силу, отстоящую от оси шва на расстояние  $a$  (рис.54), возникают напряжения среза  $\tau_{ш}^F$  от силы  $F$ , направленные вдоль шва, и напряжения среза  $\tau_{ш}^M$  от момента пары сил  $M = F \cdot a$ , направленные перпендикулярно к оси шва.

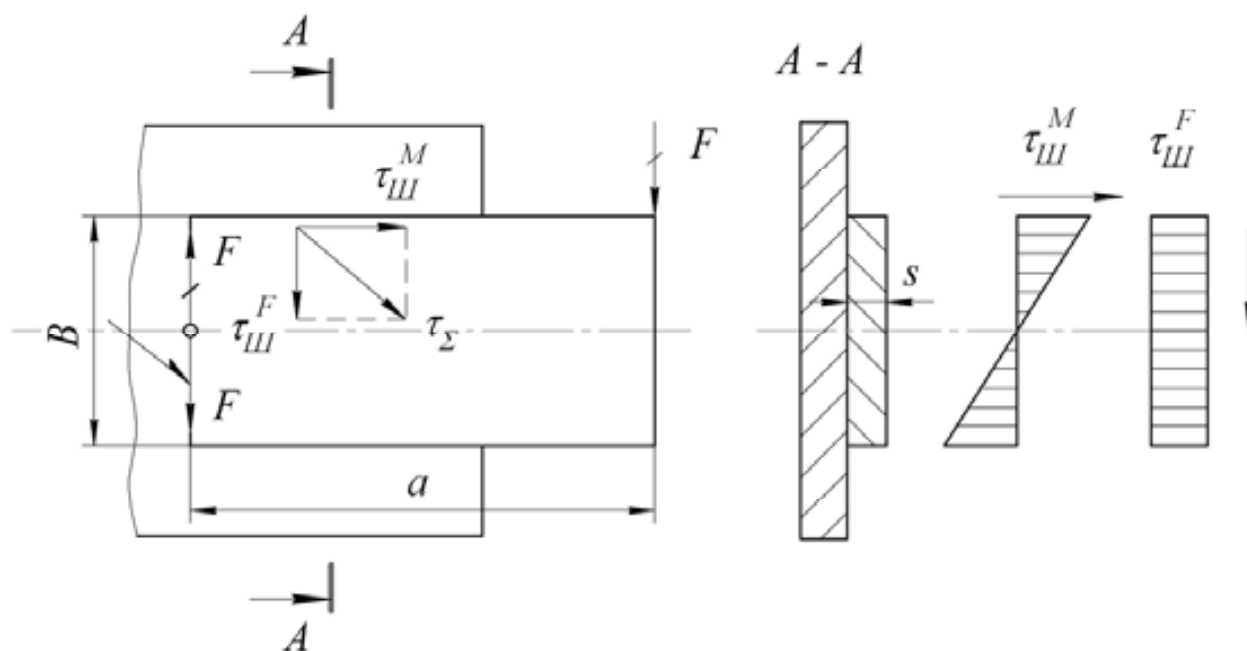


Рис.54. Соединение, нагруженное поперечной силой

Результирующие напряжения в шве  $\tau_{\Sigma}$  определяются по правилу сложения векторов

$$\tau_{\Sigma} = \sqrt{(\tau_{ш}^F)^2 + (\tau_{ш}^M)^2} . \quad (14)$$

Компоненты  $\tau_{ш}^F$  и  $\tau_{ш}^M$  вычисляют аналогично ранее рассмотренным случаям. Условие прочности соединения имеет вид

$$\tau_{\Sigma} \leq [\tau'] .$$

При действии силы  $F$  под углом к продольной оси пластины (рис.55) необходимо разложить эту силу на составляющие  $N$  и  $Q$ , а затем определить касательные напряжения в шве от действия каждой из них.

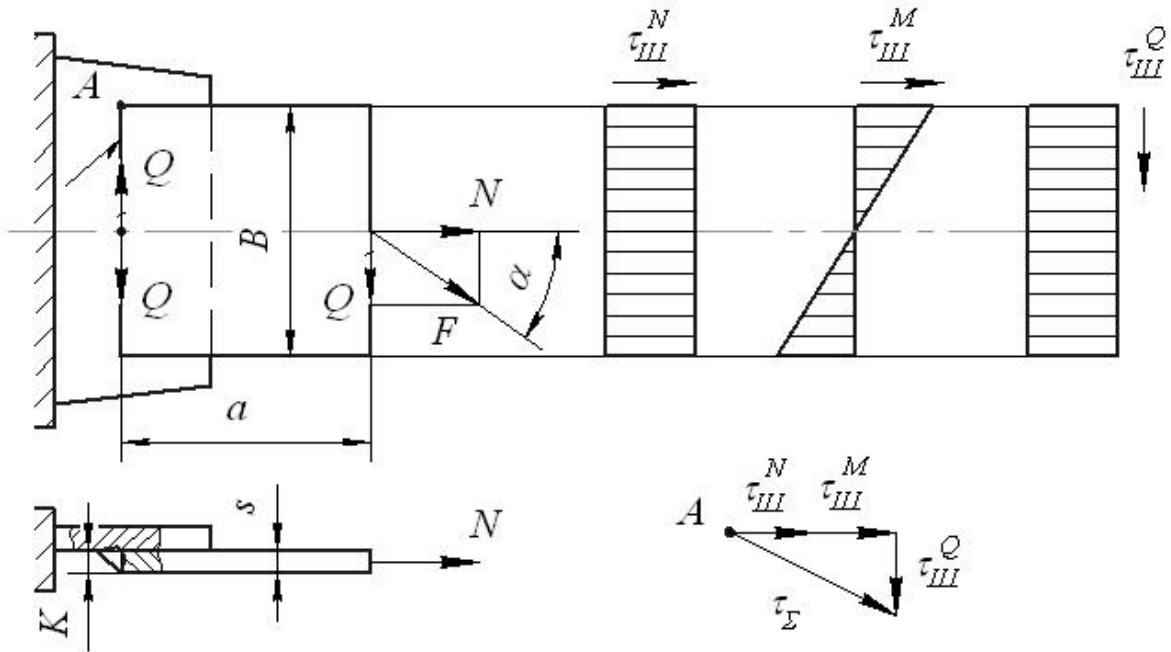


Рис.55. Соединение, нагруженное силой, действующей под углом к продольной оси пластины

Расчет комбинированных соединений с угловыми швами, лежащими в плоскости действия сил и момента, может осуществляться несколькими способами.

1. Путем расчленения соединения на составляющие. Рассмотрим соединение, показанное на рис. 56. Принимаем, что момент  $M$  уравнивается моментом пары сил в горизонтальных швах  $M_r$  и моментом в вертикальном шве  $M_B$

$$M = M_r + M_B. \quad (15)$$

В горизонтальных швах образуется пара сил. Ее момент равен

$$M_r = \tau \cdot \beta \cdot K \cdot a \cdot (B + 2K/3). \quad (16)$$

Момент в вертикальном шве вычисляется по формуле

$$M_B = \frac{\tau \cdot \beta \cdot K \cdot B^2}{6}. \quad (17)$$

По формуле (15)

$$M = \tau \cdot \beta \cdot K \cdot a \cdot (B + 2K/3) + \frac{\tau \cdot \beta \cdot K \cdot B^2}{6},$$

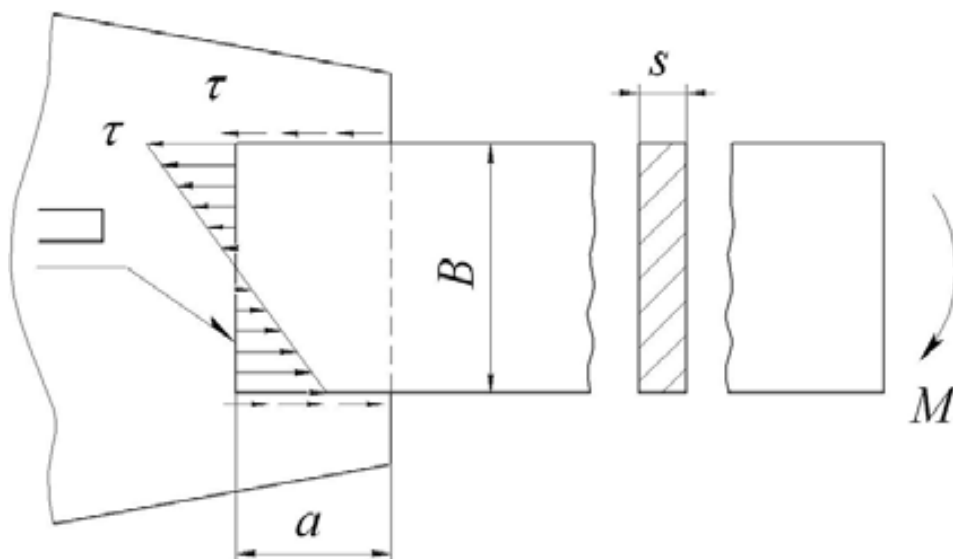


Рис.56. Сварное соединение с комбинированным швом, рассчитываемое по способу расчленения соединения

Откуда касательное напряжение

$$\tau = \frac{M}{\beta \cdot K \cdot a \cdot (B + 2K/3) + \frac{\beta \cdot K \cdot B^2}{6}} \leq [\tau'] \tag{18}$$

Пользуясь уравнением (18) при конструировании соединения, легко определить требуемую длину швов  $a$  или катет  $K$ .

2. В ряде случаев, в особенности, когда соединения имеют сложную форму (рис.57) и расчленение их на составляющие затруднено, расчет прочности целесообразно производить по способу полярного момента инерции.

При этом принимается, что под действием момента  $M$  соединение стремится повернуться относительно своего центра тяжести  $O$ . В элементе  $dA$  шва образуется реактивная сила

$$dF = \tau \cdot dA.$$

Момент реактивной силы относительно точки  $O$  равен

$$dM = r \cdot dF = \tau \cdot r \cdot dA.$$

Для всего соединения

$$M = \int_A \tau \cdot r \, dA. \quad (19)$$

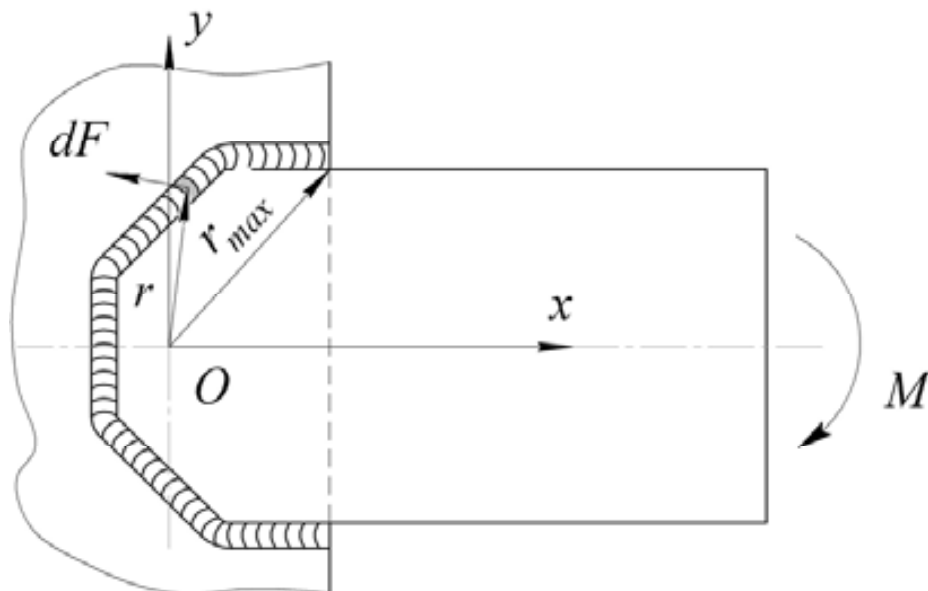


Рис.57. К расчету комбинированного шва по способу полярного момента инерции

Так как перемещение точек шва пропорционально расстояниям  $r$  до центра вращения, то и напряжения  $\tau$  определяются как линейные функции от  $r$ . Из соотношения

$$\frac{\tau}{\tau_1} = \frac{r}{1}$$

находим  $\tau = \tau_1 \cdot r$ , где  $\tau_1$  – напряжение на условном расстоянии от центра тяжести, равном единице. Так как  $\tau_1$  не зависит от  $r$ , то формулу (19) можно записать так

$$M = \tau_1 \int_A r^2 \, dA.$$

Интеграл представляет собой полярный момент инерции сварных швов относительно точки  $O$

$$I_\rho = \int_A r^2 \, dA.$$

Полярный момент инерции равен сумме двух осевых

$$I_\rho = I_x + I_y.$$

Находим напряжение

$$\tau_1 = \frac{M}{I_\rho}$$

Наибольшее напряжение равно

$$\tau_{max} = \frac{M}{I_\rho} r_{max} \leq [\tau'] .$$

Расчет прочности по способу полярного момента инерции дает большие значения напряжения, поэтому вычисление напряжения по этому способу обеспечивает большой запас прочности.

3. В основе расчета по третьему способу (способу осевого момента инерции) лежит допущение, что напряжения в швах пропорциональны деформациям в основном металле (рис.58) и, следовательно, возрастают в линейной зависимости от расстояния точки до нейтральной оси элемента.

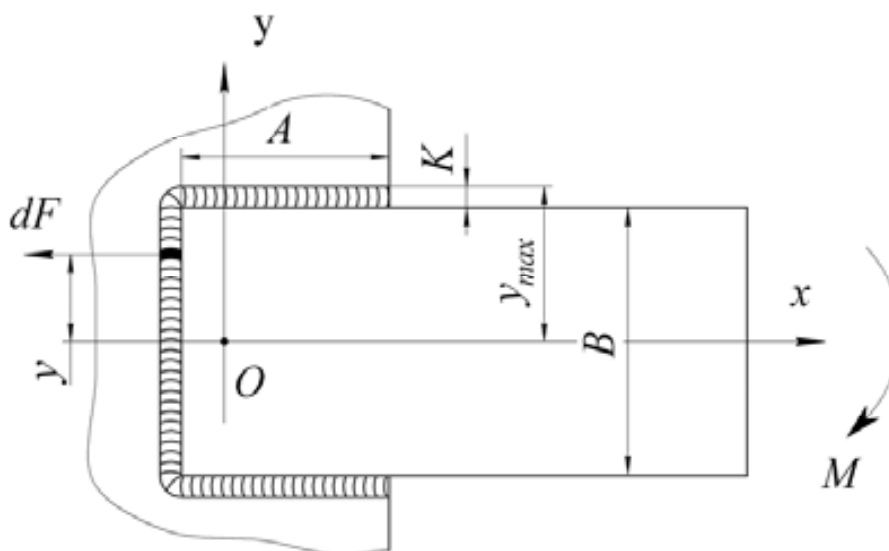


Рис. 58. Сварное соединение в плоскости изгибающего момента. Расчет швов по осевому моменту инерции

Реактивное усилие в элементе равно

$$dF = \tau \cdot dA.$$

Реактивный момент в элементе определяется по формуле

$$dM = y \cdot dF.$$

Полный момент внутренних сил уравнивает момент, действующий на соединение

$$M = \int y \cdot dF = \int_F \tau \cdot y \cdot dA.$$



Принимаем, что напряжения представляют собой линейную функцию расстояния до оси. При этом

$$\frac{\tau}{\tau_1} = \frac{y}{1},$$

где  $\tau_1$  – напряжение на расстоянии, равном единице от оси  $x$ .

Тогда

$$M = \tau_1 \cdot \int y^2 \cdot dA.$$

Интеграл выражает момент инерции швов относительно оси  $x$ .

Наибольшее напряжение

$$\tau_{max} = \frac{M}{I_x} y_{max} \leq [\tau'].$$

Результаты расчета прочности по способу осевого момента незначительно отличаются от результатов расчета по способу расчленения соединения на составляющие.

Наиболее часто применяют первый способ, особенно при конструировании соединений с учетом заданных усилий. Второй способ используют для определения напряжений при заданных размерах соединений. Третий способ используют в тех случаях, когда расчленение соединений затруднительно.

Тавровые соединения, работающие на растяжение (рис.59), рассчитывают в зависимости от способа сварки. При ручной сварке (рис.59а) условие прочности соединения имеет вид

$$\tau_{ш} = \frac{F}{2 \cdot \beta \cdot K \cdot l_{ш}} \leq [\tau'], \quad (20)$$

где  $l_{ш}$  - расчетная длина шва.

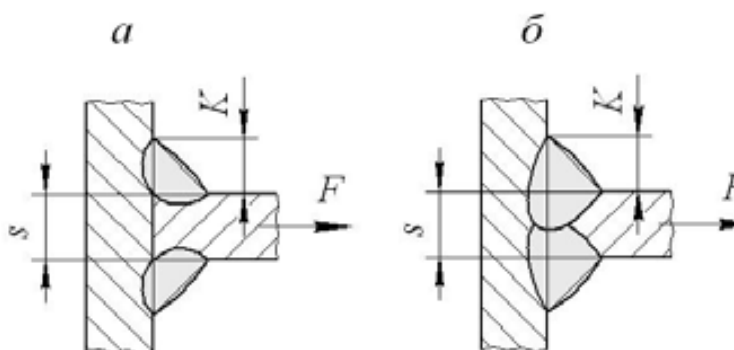


Рис.59. Тавровые соединения, работающие на растяжение: а – выполненное угловыми швами; б – выполненное стыковым швом

При автоматической сварке с полным проваром (рис.59б) тавровое соединение рассчитывают как стыковое, а условие прочности соединения имеет вид

$$\sigma_{\text{ш}} = \frac{F}{s \cdot l_{\text{ш}}} \leq [\sigma'] .$$

Таким образом, при соединении угловыми швами без полного провара расчет ведется по касательным напряжениям, возникающим в биссекторных сечениях швов, а при расчете соединений, выполненных швами с полным проваром, шов рассчитывается аналогично металлу соединяемых элементов.

Рассмотрим соединение кронштейна со стойкой, выполненное горизонтальными угловыми швами, изображенное на рис. 60.

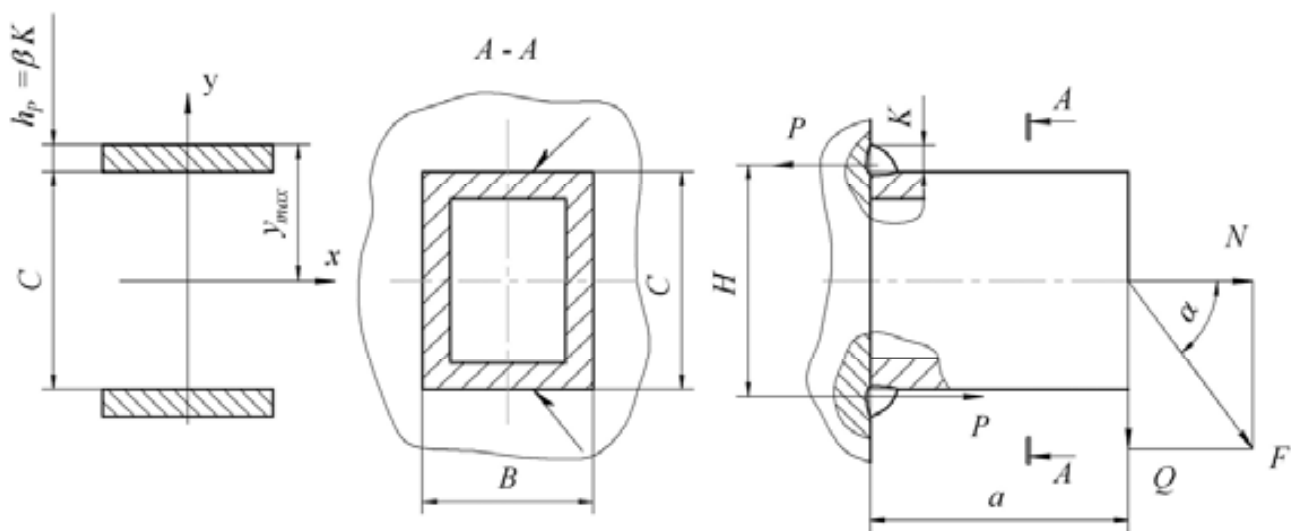


Рис.60. Тавровое соединение

Величину касательных напряжений в швах от изгибающего момента  $M = Q \cdot a$  можно определить двумя способами:

1) по первому способу

$$\tau_M = \frac{M}{W_{\text{ш}}},$$

где  $W_{\text{ш}}$  – осевой момент сопротивления угловых швов относительно оси  $x$

$$W_{\text{ш}} = \frac{I_{\text{ш}}}{y_{\text{max}}},$$

где  $I_{\text{ш}}$  – осевой момент инерции биссекторных сечений швов относительно оси  $x$ ;  $y_{\text{max}} = 0,5C + h_p$  – расстояние от оси  $x$  до наиболее удаленной точки шва.

Момент инерции биссекторных сечений швов

$$I_{ш} = 2I_0 + 2A_{ш} \cdot \left( \frac{C}{2} + \frac{h_p}{2} \right)^2 = 2 \frac{B \cdot h_p^3}{12} + 2B \cdot h_p \left( \frac{C}{2} + \frac{h_p}{2} \right)^2, \quad (21)$$

где  $I_0$  – момент инерции биссекторных сечений швов относительно собственной оси;  $A_{ш} = h_p \cdot B$  – расчетная площадь сечения углового шва.

При  $C / h_p \geq 10$  значениями  $I_0$ , а также членами, содержащими величину катета  $K$  в степени больше первой, пренебрегают ввиду малого их значения.

Тогда выражение (21) упрощается:

$$I_{ш} = \frac{B \cdot h_p \cdot C^2}{2}.$$

2) по второму способу

$$\tau_M = \frac{P}{A_{ш}} = \frac{M}{H \cdot A_{ш}},$$

где  $H = C + 2K / 3$  – плечо пары сил  $P$ .

Напряжения от нормальной силы  $N$  равны

$$\tau_N = \frac{N}{2A_{ш}}.$$

Напряжения от поперечной силы  $Q$

$$\tau_Q = \frac{Q}{2A_{ш}}.$$

Касательное напряжение в наиболее нагруженном шве (верхний шов)

$$\tau_{\Sigma} = \sqrt{(\tau_N + \tau_M)^2 + \tau_Q^2}.$$

Условие прочности соединения

$$\tau_{\Sigma} \leq [\tau'].$$

При приварке элемента только вертикальными угловыми швами (рис.61) расчет выполняется аналогично.

Максимальные по величине напряжения возникают в точке  $B$  сварного шва. Они равны

$$\tau_{\Sigma} = \sqrt{(\tau_N + \tau_M)^2 + \tau_Q^2},$$

где

$$\tau_N = \frac{N}{2A_{ш}} = \frac{N}{2h_p \cdot C};$$

$$\tau_Q = \frac{Q}{2A_{шл}} = \frac{Q}{2h_p \cdot C};$$

$$\tau_M = \frac{Q \cdot a}{W_{шл}} = \frac{3Q \cdot a}{h_p C^2}.$$

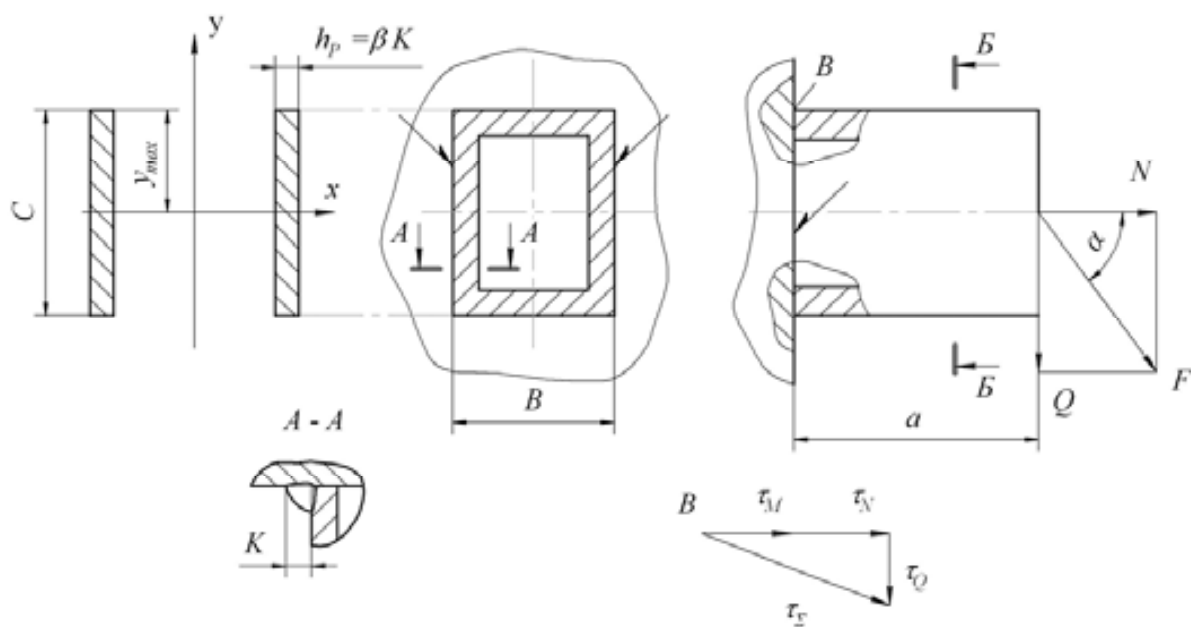


Рис.61. К расчету соединения с вертикальными угловыми швами

Условие прочности имеет вид

$$\tau_{\Sigma} \leq [\tau'].$$

При приварке кронштейна по контуру (рис.62) расчет швов производят с учетом следующих особенностей.

Момент сопротивления угловых швов  $W_{шл}$  определяется для той фигуры, которая образована биссекторными сечениями всех швов (заштрихованная фигура на рис.62).

При  $C / K \geq 10$  осевой момент инерции швов относительно оси  $x$  будет равен

$$I_{шл} = \frac{B \cdot h_p \cdot C^2}{2} + \frac{h_p \cdot C^3}{6}.$$

Тогда осевой момент сопротивления

$$W_{шл} = \frac{I_{шл}}{y_{max}} \approx h_p C \cdot \left( B + \frac{C}{3} \right).$$

Условно считают, что поперечную силу, равную  $Q$ , воспринимают швы, направленные вдоль линии действия этой силы. С учетом этого обстоятельства, напряжение среза от силы  $Q$  составит

$$\tau_Q = \frac{Q}{2C \cdot h_p}.$$

В остальном расчет проводится аналогично рассмотренным ранее случаям.

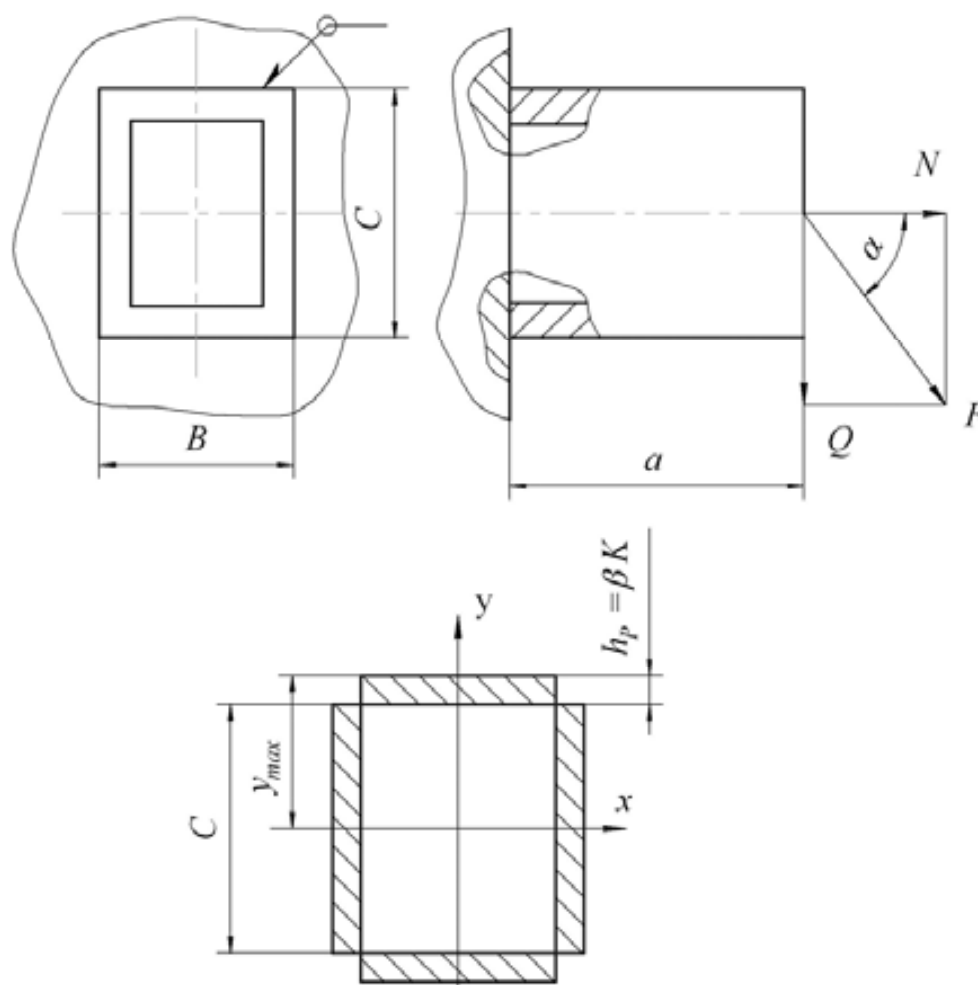


Рис.62. К расчету соединения при приварке по замкнутому контуру

### 7.3. Расчет соединений, выполненных точечной сваркой

Точечной контактной сваркой соединяют элементы малых толщин (от долей до нескольких миллиметров). В зависимости от расположения точек листовые точечные соединения бывают однорядные и многорядные. Точечные соединения внахлестку, сваренные из двух листов, называют односрезовыми (рис.63а), из трех листов – двухсрезовыми (рис.63б).

Не рекомендуется допускать точечных соединений элементов, отношение толщин которых больше трех. Точечной сваркой можно сваривать

два, три и более элементов, как одинаковой, так и разной толщины, при этом элемент большей толщины следует укладывать между двумя другими.

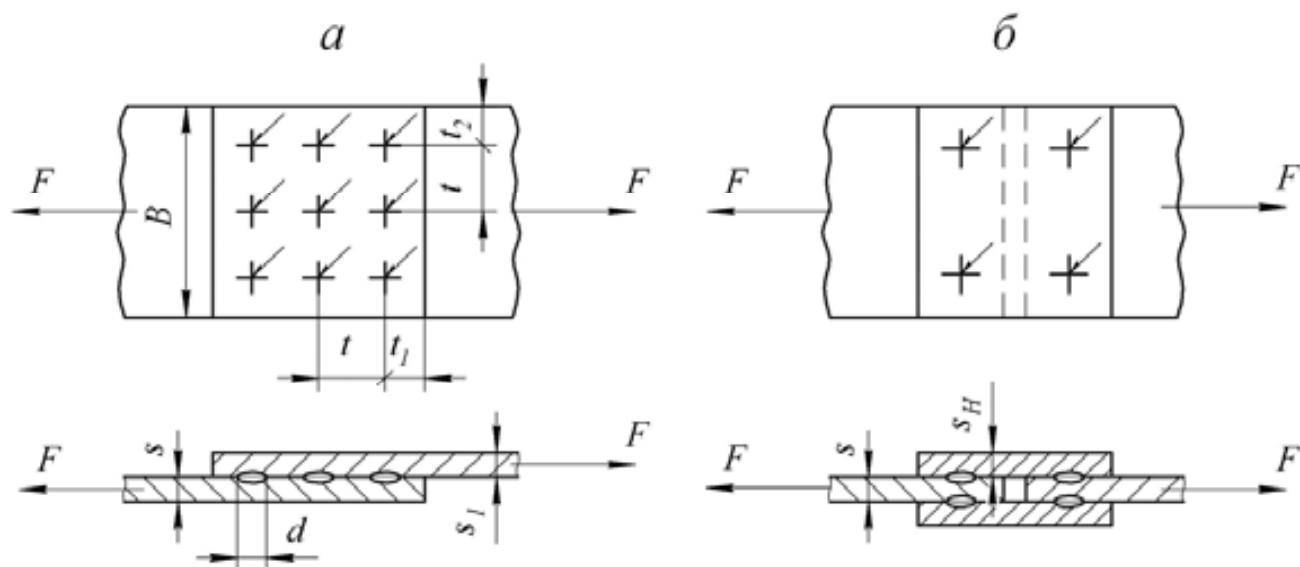


Рис.63. Точечные соединения внахлестку

В сварном точечном и шовном соединении приняты следующие обозначения:

$d$  – диаметр точки;

$t$  – шаг точек;

$t_1$  – расстояние от центра сварной точки до края детали в направлении действия силы;

$t_2$  – расстояние от точки до свободной кромки в направлении, перпендикулярном действию силы;

$h$  и  $l$  – соответственно, ширина и длина шва при роликовой сварке;

$s$ ,  $s_1$  – толщина соединяемых листов;

$s_H$  – толщина накладки.

Расстояние  $t$  должно быть не меньше некоторого предельного размера ввиду шунтирования тока через ранее сваренную точку. Чем больше шаг, тем меньше шунтирование и, как следствие, стабильнее и лучше результаты сварки. При назначении этих параметров обычно руководствуются следующими соотношениями:  $t \geq 3d$ ;  $t_1 \geq 2d$ ;  $t_2 \geq 1,5d$ .

Диаметр точки назначается в зависимости от толщины соединяемых элементов. Для стальных деталей рекомендуется:

$$\begin{aligned} d &= 1,2s + 4, & \text{при } s \leq 1,5 \div 3 \text{ мм,} \\ d &= 1,5s + 5, & \text{при } s \geq 3 \text{ мм,} \end{aligned} \quad (22)$$

где  $s$  – наименьшая толщина свариваемых листов.

При расчете прочности односрезного сварного соединения используют зависимость

$$\tau = \frac{4F}{i\pi d^2} \leq [\tau']_T, \quad (23)$$

где  $[\tau']_T$  – допускаемое напряжение в точке на срез,  $i$  – число сварных точек в соединении.

Для двухсрезных точечных соединений

$$\tau = \frac{2F}{i\pi d^2} \leq [\tau']_T. \quad (24)$$

Точки в сварном соединении следует располагать таким образом, чтобы они воспринимали преимущественно усилия среза, а не отрыв (рис. 64).

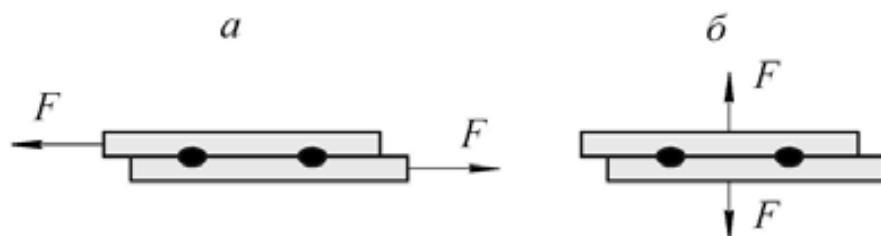


Рис.64. Точечное соединение, работающее:  $a$  – на срез;  $b$  – на отрыв

При расчете точечного сварного соединения, работающего на отрыв, расчет ведут по двум условиям

а) на отрыв по сечению в плоскости соприкосновения деталей с учетом расчетной площади разрыва точек

$$\sigma = \frac{4F}{i\pi d^2} \leq [\sigma']_{O.T.}, \quad (25)$$

где  $[\sigma']_{O.T.}$  – допускаемое напряжение в точке при отрыве;

б) на вырывание (срез) сварной точки из основного металла по ее периметру

$$\tau_B = \frac{F}{i\pi d s} \leq [\tau'], \quad (26)$$

где  $s$  – толщина наиболее тонкой детали.

Увеличение диаметра точки повышает ее сопротивление срезу, а увеличение толщины детали повышает сопротивление основного металла отрыву. Допускаемые напряжения в точке при отрыве следует принимать более низкими, чем допускаемые напряжения в точке при срезе, при этом необходимо пользоваться экспериментальными данными. При расчете на прочность соединения, имеющего ряд точек, предполагается равномерное распределение нагрузки по точкам. С учетом неравномерного распределения

усилий, что характерно для смешанного соединения, допускаемое напряжение целесообразно снизить на 10 – 20 %.

Для односрезного шовного соединения (рис.65) условие прочности имеет вид

$$\tau = \frac{F}{h \cdot l} \leq [\tau']_T, \quad (27)$$

где  $h$  – ширина шва;  $l$  – длина шва.

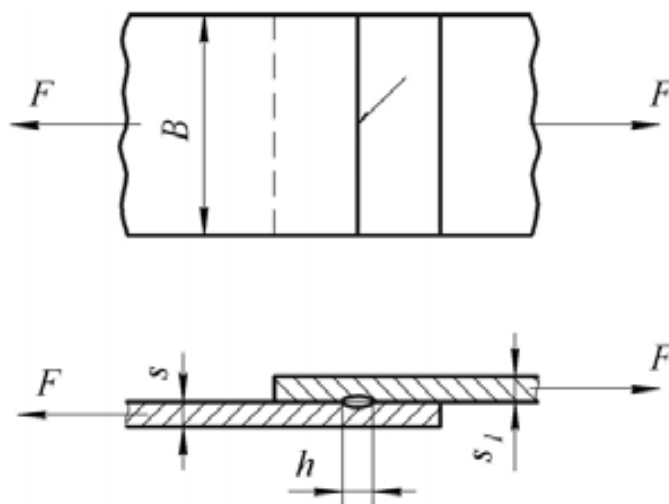


Рис.65. Шовное соединение внахлестку

Для соединения, воспринимающего момент (рис.66) вначале находят срезающее усилие

$$T = \frac{M}{h},$$

а затем вычисляют напряжение среза в точке от найденного усилия

$$\tau = \frac{4M}{h\pi d^2} \leq [\tau'].$$

Для соединения, воспринимающего изгибающий момент и поперечную силу (рис.67), расчет заключается в определении результирующего напряжения среза в точке и сравнении его с допускаемым

$$\tau_{\Sigma} = \sqrt{\tau_M^2 + \tau_Q^2} \leq [\tau']_T, \quad (28)$$

где  $\tau_M$  – напряжение среза в точке от момента  $M = F \cdot l$ ;  $\tau_Q$  – напряжение среза в точке от поперечной силы  $Q/2$ , определяемое по формуле

$$\tau_Q = \frac{2Q}{\pi d^2}.$$



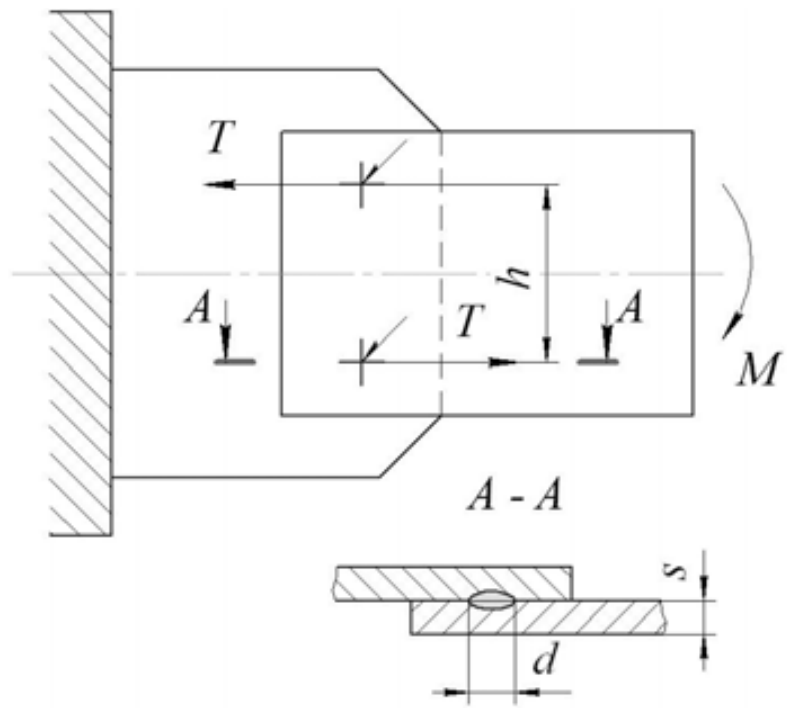


Рис.66. Точечное соединение, нагруженное моментом

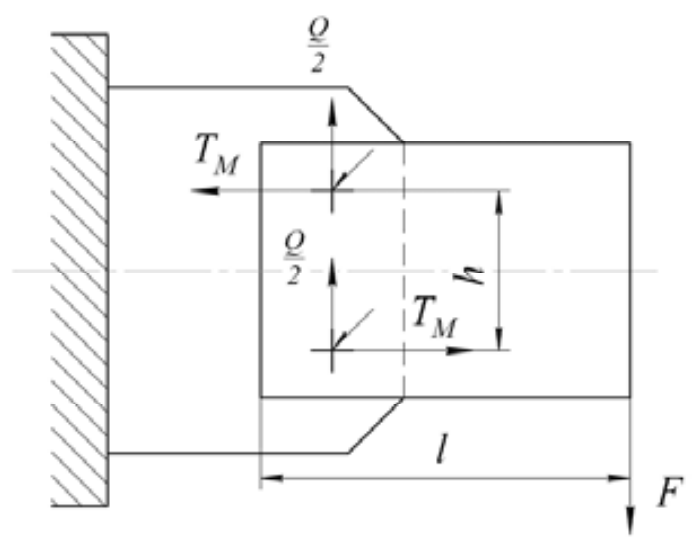


Рис. 67. Точечное соединение, нагруженное моментом и поперечной силой

Для соединения с несколькими точками в ряду (рис.68), воспринимающего поперечную силу, расчет ведется по результирующему касательному напряжению по формуле (28), в которой составляющие  $\tau_M$  и  $\tau_Q$  вычисляются по следующим формулам:

от момента  $M = F \cdot l$

$$\tau_M = \frac{4 M y_{max}}{\pi d^2 \Sigma y^2},$$

от поперечной силы

$$\tau_Q = \frac{4Q}{i\pi d^2}.$$

В этих формулах  $y_{max}$  – ордината точки наиболее удаленной от нейтральной оси;

$$\sum y^2 = y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_i^2;$$

где  $i$  – количество точек в вертикальном ряду.

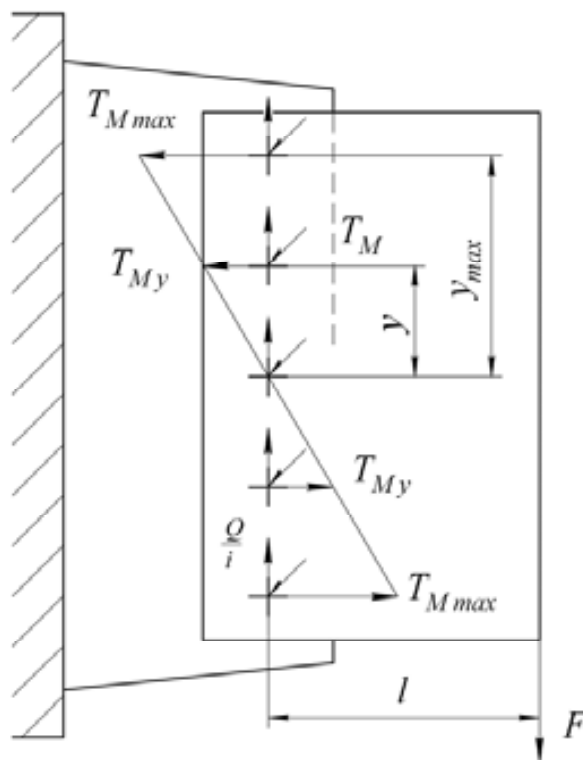


Рис. 68. Точечное соединение с большим количеством точек в ряду

Для соединения с несколькими рядами точек (рис.69) расчет также ведется по результирующему напряжению, а напряжения  $\tau_M$  и  $\tau_Q$  вычисляются по следующим формулам:

от момента  $M = F \cdot l$

$$\tau_M = \frac{4M y_{max}}{m \pi d^2 \sum y^2},$$

от поперечной силы

$$\tau_Q = \frac{4Q}{i m \pi d^2},$$

где  $m$  – количество вертикальных рядов.

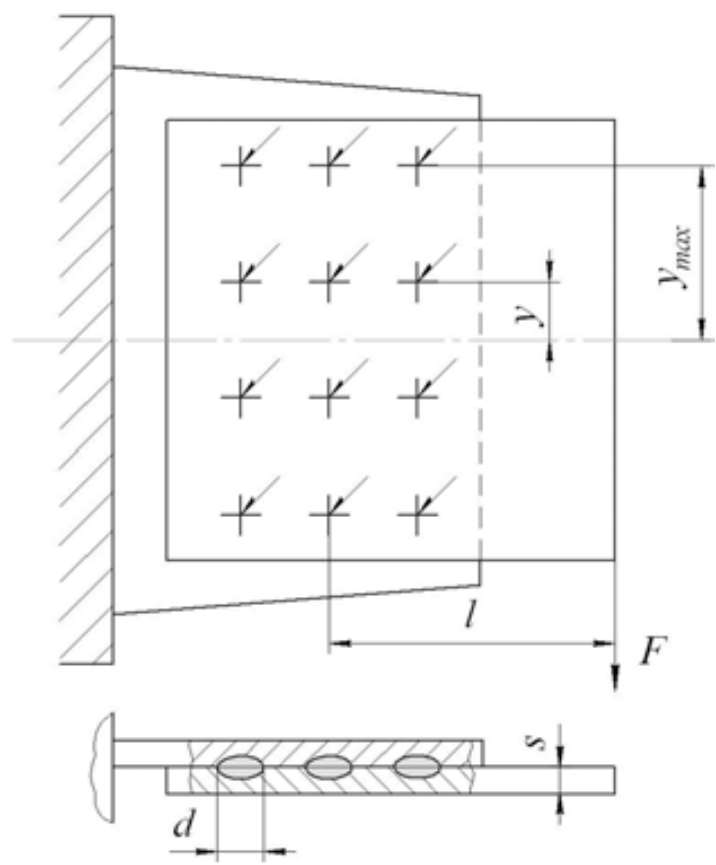


Рис. 69. Многорядное точечное соединение

**7.4. Расчет сварных соединений при переменных нагрузках**

При воздействии переменных нагрузок сварные соединения рассчитывают по тем же формулам, что и при статической нагрузке. Однако при этом допускаемые напряжения понижают умножением на коэффициент  $\gamma \leq 1$

$$[\sigma]_R = \gamma [\sigma]_P; \quad [\tau]_R = \gamma [\tau], \quad (29)$$

где  $\gamma$  - коэффициент понижения допускаемых напряжений

$$\gamma = \frac{1}{(a \cdot k_{\text{эф}} \pm b) - (a \cdot k_{\text{эф}} \mp b) \cdot R} \leq 1, \quad (30)$$

где  $k_{\text{эф}}$  – эффективный коэффициент концентрации напряжений (табл. 10 и 11);  $a$  и  $b$  – коэффициенты, равные

- для углеродистых сталей  $a = 0,58, b = 0,26;$
- для низколегированных сталей  $a = 0,65, b = 0,30;$

$R$  – коэффициент асимметрии цикла, равный

$$R = \sigma_{min} / \sigma_{max} = F_{min} / F_{max} \quad (\text{или } R = \tau_{min} / \tau_{max}) .$$

Расчет выполняют по максимальному (по абсолютной величине) напряжению цикла ( $\sigma_{max}$  или  $\tau_{max}$ ) так, как если бы это напряжение было статическим. При переменных нагрузках рекомендуют рассчитывать прочность не только сварного шва, но и самих деталей в зоне шва. Допускаемое напряжение для деталей также умножают на коэффициент  $\gamma$ .

Таблица 10

Эффективный коэффициент концентрации напряжений для расчета сварных швов и деталей в зоне сварки

Расчетный элемент	Эффективный коэффициент концентрации $K_{эф}$	
	низкоуглеродистая сталь	низколегированная сталь
Деталь в месте перехода к стыковому шву	1,5	1,9
То же к лобовому шву	2,7	3,3
То же к фланговому шву	3,5	4,5
Угловые лобовые швы	2,0	2,0
Угловые фланговые швы	3,5	4,5

Таблица 11

Эффективный коэффициент концентрации напряжений для расчета соединений контактной сваркой (для деталей и швов)

Марка материала	Состояние деталей (термообработка)	Толщина деталей	Эффективный коэффициент концентрации напряжений $K_{эф}$ для рабочих швов	
Сталь 10	Нормализация	3+3	7,5	5
Сталь 30ХГСА	Отпуск	1,5+1,5	12	12
Титановый сплав	В состоянии поставки	1,5+1,5	10	5
Алюминиевый сплав	В состоянии поставки	1,5+1,5	5	2,5

Верхние знаки в формуле (30) принимаются, когда среднее напряжение цикла положительно

$$\sigma_{CP} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} > 0$$

и при расчете по касательным напряжениям. Если при вычислении получают  $\gamma > 1$ , то в расчете принимают  $\gamma = 1$ .

## 8. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Пример 1.

Штанга буровой установки (рис.70) нагружена осевой силой  $F = 200$  кН и крутящим моментом  $T = 500$  Н·м. Выполнить проверочный расчет стыкового соединения штанги, если фланец и труба изготовлены из стали 15ГС; сварка ручная, электродами типа Э50;  $D = 200$  мм;  $s = 8$  мм. Допускаемое напряжение для сварного шва  $[\sigma] = 220$  МПа.

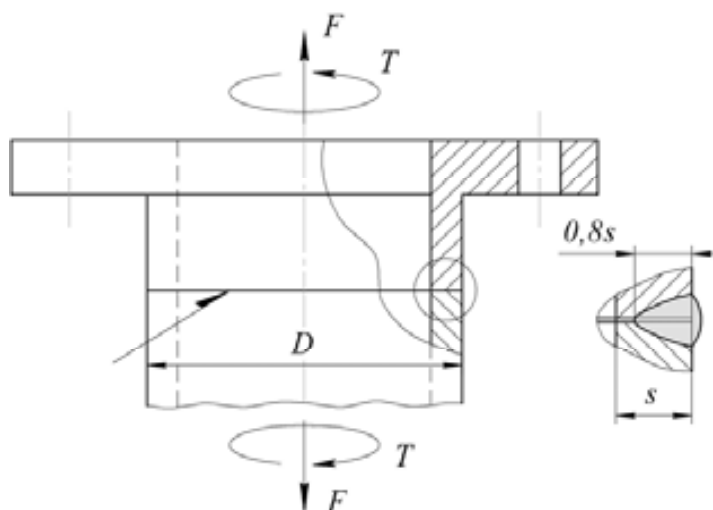


Рис. 70. Сварное соединение встык трубы и фланца

Решение.

В сварном шве возникают:

нормальные напряжения от осевой силы  $F$ , равные

$$\sigma_{\text{ш}} = \frac{F}{A_{\text{ш}}} = \frac{F}{\pi \cdot (D - 1,6s) \cdot 0,8s} = \frac{200 \cdot 10^3}{3,14 \cdot (200 - 1,6 \cdot 8) \cdot 0,8 \cdot 8} \approx 53 \text{ МПа};$$

касательные напряжения от вращающего момента  $T$

$$\tau_{\text{ш}} = \frac{T}{W_{\rho}} = \frac{500 \cdot 10^3}{3,65 \cdot 10^5} \approx 1,4 \text{ МПа},$$

где  $W_{\rho}$  - полярный момент инерции сечения сварного шва, равный

$$\begin{aligned} W_{\rho} &= \left[ \frac{\pi \cdot D^4}{32} - \frac{\pi \cdot (D - 1,6 \cdot s)^4}{32} \right] \cdot \frac{2}{D} = \\ &= \left[ \frac{3,14 \cdot 200^4}{32} - \frac{3,14 \cdot (200 - 1,6 \cdot 8)^4}{32} \right] \cdot \frac{2}{200} \approx 3,65 \cdot 10^5 \text{ мм}^3. \end{aligned}$$

Эквивалентное напряжение по четвертой гипотезе прочности равно

$$\sigma_3 = \sqrt{\sigma_{\text{ш}}^2 + 3 \cdot \tau_{\text{ш}}^2} = \sqrt{53^2 + 3 \cdot 1,4^2} \approx 53,1 < 220 \text{ МПа} = [\sigma'].$$

Пример 2.

Рассчитать длину уголковых швов для соединения уголка с фасонкой (рис.71) при допускаемом напряжении  $[\tau'] = 100$  МПа. Усилие, действующее на уголок,  $F = 200$  кН.

Решение.

1. Суммарная длина сварных швов равна

$$L = \frac{F}{\beta \cdot K \cdot [\tau']} = \frac{200000}{0,7 \cdot 8 \cdot 100} = 357 \text{ мм.}$$

2. Используя формулы (11) и табл.9 находим

$$l_1 = L \cdot \frac{c}{b} = 357 \cdot 0,7 \approx 250 \text{ мм}; \quad l_2 = \frac{L - l_1}{2} = \frac{357 - 250}{2} = 53,5 \text{ мм.}$$

Учитывая возможные непровар в начале и кратер в конце швов, окончательно принимаем  $l_1 = 260$  мм и  $l_2 = 65$  мм.

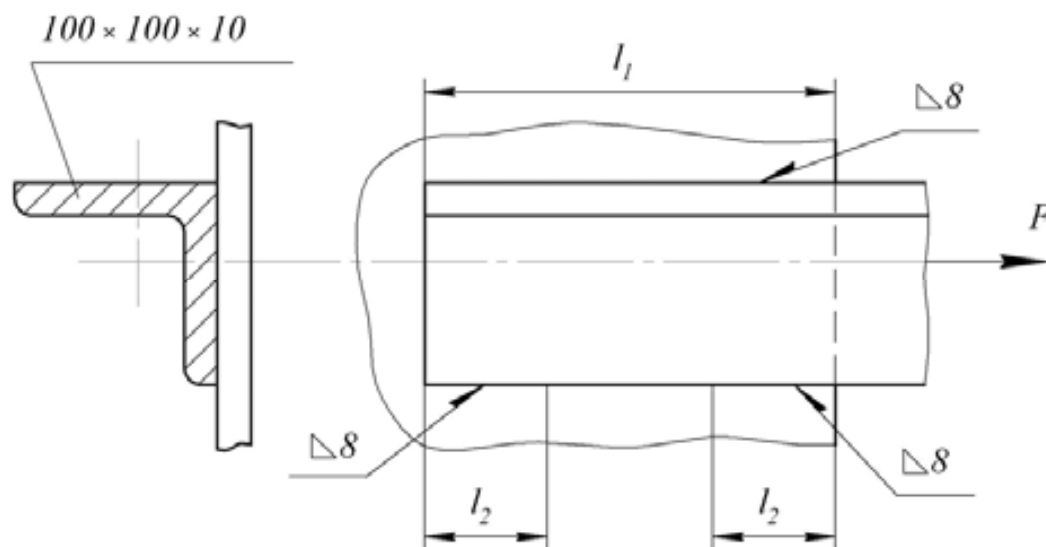


Рис.71. Соединение уголка с фасонкой угловыми швами

Пример 3.

Рассчитать сварное соединение двух частей клеммового рычага (рис.72), если сила  $F = 1000$  Н, толщина пластины  $s = 12$  мм, расстояние  $a = 600$  мм. Материал соединяемых деталей Ст3, допускаемое напряжение для

материала соединяемых деталей  $[\sigma]_P = 160$  МПа. Сварка ручная, электродами Э42 без обработки шва.

Решение.

Определяем ширину приваренного рычага из условия его прочности по нормальным напряжениям при изгибе (принимаем  $[\sigma]_P = [\sigma]_И$ )

$$\sigma = \frac{M}{W} \leq [\sigma]_И,$$

где  $M$  – изгибающий момент, равный

$$M = F \cdot a = 1000 \cdot 600 = 6 \cdot 10^5 \text{ Н}\cdot\text{мм};$$

$W$  – осевой момент сопротивления площади поперечного сечения рычага, равный

$$W = b^2 \cdot s / 6.$$

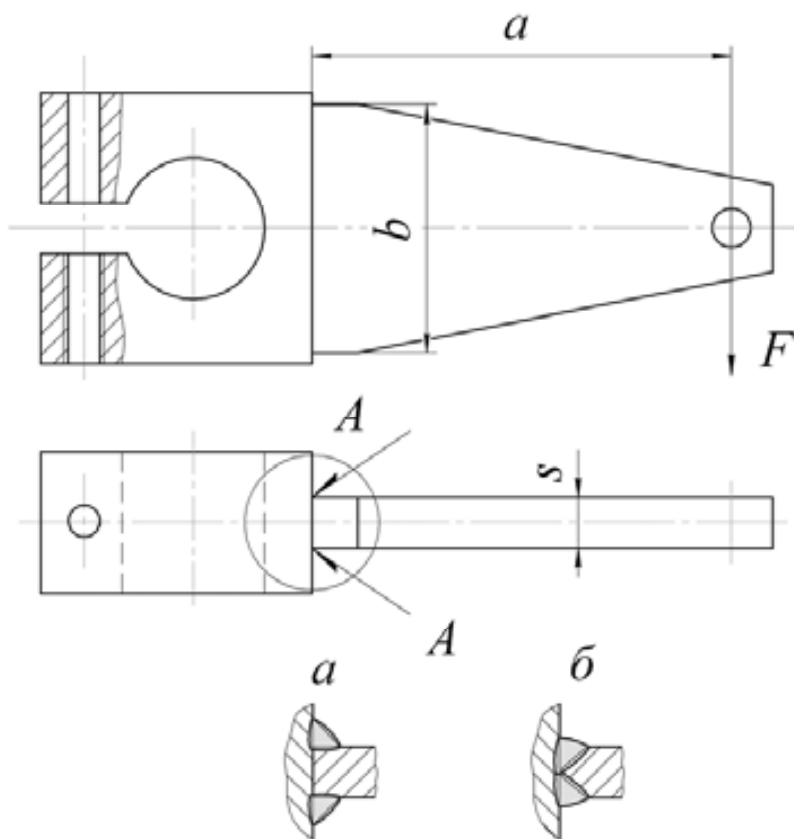


Рис. 72. Клеммовый рычаг:

$a$  – соединение угловыми швами;  $b$  – угловыми швами

Из условия прочности следует, что необходимый осевой момент сопротивления площади сечения равен

$$W = M / [\sigma]_H = 6 \cdot 10^5 / 160 = 3750 \text{ мм}^3.$$

Следовательно, ширина рычага должна быть

$$b \geq \sqrt{\frac{6 \cdot W}{s}} = \sqrt{\frac{6 \cdot 3750}{12}} = 43,3 \text{ мм.}$$

Окончательно принимаем  $b = 45$  мм.

Расчет сварного соединения.

Рассмотрим два варианта сварного соединения:

- а) тавровое соединение без разделки кромок – шов угловой (рис. 72а);
- б) тавровое соединение с разделкой кромок – шов стыковой (рис. 72б).

При приведении силы  $F$  к центру тяжести сварных швов находим, что на швы действует поперечная сила  $Q = F$  и момент  $M = F \cdot a$ .

Расчет таврового соединения без разделки кромок. Назначаем катет швов равным  $K = 12$  мм. Допускаемое напряжение для угловых швов при ручной дуговой сварке  $[\tau'] = 0,6 [\sigma]_P = 0,6 \cdot 160 = 96$  МПа.

Напряжения в швах от поперечной силы  $Q$  равны

$$\tau_Q = \frac{Q}{A_{ш}} = \frac{Q}{2\beta K \cdot b} = \frac{1000}{2 \cdot 0,7 \cdot 12 \cdot 45} \approx 1,3 \text{ МПа}$$

Напряжения в швах от изгибающего момента  $M = 6 \cdot 10^5$  Н·мм равны

$$\tau_M = \frac{M}{W} = \frac{6 \cdot 10^5}{5670} \approx 105,9 \text{ МПа.}$$

где  $W$  – осевой момент сопротивления площади сечения сварного шва, равный

$$W = 2 \frac{\beta K \cdot b^2}{6} = 2 \cdot \frac{0,7 \cdot 12 \cdot 45^2}{6} \approx 5670 \text{ мм}^3.$$

Результирующее напряжение равно

$$\tau_{\Sigma} = \sqrt{\tau_Q^2 + \tau_M^2} = \sqrt{1,2^2 + 105,9^2} \approx 106 \text{ МПа.}$$

Условие прочности не выполнено. Поэтому увеличим высоту привариваемого рычага до  $b = 50$  мм. Тогда осевой момент сопротивления площади сечения сварного шва

$$W = 2 \frac{\beta K \cdot b^2}{6} = 2 \cdot \frac{0,7 \cdot 12 \cdot 50^2}{6} \approx 7000 \text{ мм}^3.$$

Напряжения в шве от изгибающего момента



$$\tau_M = \frac{M}{W} = \frac{6 \cdot 10^5}{7000} \approx 85,7 \text{ МПа}.$$

Напряжения от поперечной силы

$$\tau_Q = \frac{Q}{A_{ш}} = \frac{Q}{2\beta K \cdot b} = \frac{1000}{2 \cdot 0,7 \cdot 12 \cdot 50} \approx 1,2 \text{ МПа}.$$

Результирующее напряжение станет равным

$$\tau_{\Sigma} = \sqrt{\tau_Q^2 + \tau_M^2} = \sqrt{1,3^2 + 85,7^2} \approx 86 \text{ МПа}.$$

Условие прочности выполнено.

Расчет таврового соединения с разделкой кромок – шов стыковой.

Допускаемое напряжение для сварного шва  $[\sigma'] = 0,9[\sigma]_P = 0,9 \cdot 160 = 144 \text{ МПа}$ .

Осевой момент сопротивления площади сечения сварного шва равен

$$W = b^2 \cdot s / 6 = 50^2 \cdot 12 / 6 = 5000 \text{ мм}^3;$$

Максимальные напряжения в сварном шве

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{6 \cdot 10^5}{5000} \approx 120 \text{ МПа} < 144 = [\sigma'].$$

Таким образом, условие прочности для сварного шва выполняется и в этом случае.

Пример 4.

Определить параметр  $a$  соединения полосы из стали Ст3 сечением  $150 \times 20$  мм вертикальным и горизонтальными швами, равнопрочного целому элементу при изгибе (рис.73); допускаемое напряжение  $[\sigma]_P = 160 \text{ МПа}$ ; сварка полуавтоматическая ( $\beta = 0,8$ );  $[\tau'] = 0,65[\sigma]_P$ .

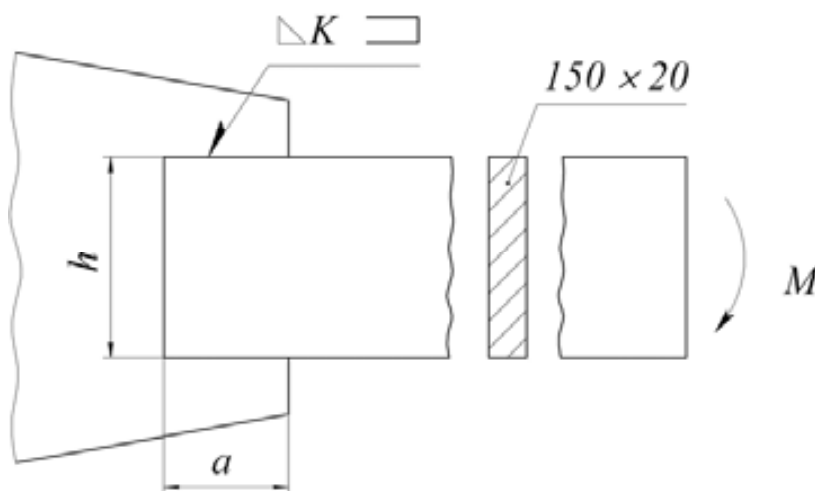


Рис. 73. К расчету комбинированного соединения полосы угловыми швами

Определим максимальный момент, нагружающий соединение, из условия прочности полосы при изгибе

$$M = [\sigma]_p \cdot \frac{s \cdot h^2}{6} = 160 \cdot \frac{20 \cdot 150^2}{6} = 12 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{мм}.$$

Допускаемое напряжения для углового шва равно

$$[\tau'] = 0,65 \cdot [\sigma]_p = 0,65 \cdot 160 = 104 \text{ МПа}.$$

Принимаем катет швов  $K = 10$  мм. Момент, допускаемый в вертикальном шве, равен

$$M_B = [\tau'] \cdot \frac{\beta \cdot K h^2}{6} = 104 \cdot \frac{0,8 \cdot 10 \cdot 150^2}{6} = 3,12 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{мм}.$$

Момент, допускаемый в горизонтальных швах, вычисляется по формуле

$$M_r = M - M_B = 12 \cdot 10^6 - 3,12 \cdot 10^6 = 9,88 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{мм}.$$

Усилие на один горизонтальный шов равно

$$F_r = \frac{M_r}{h + \frac{2}{3}K} = \frac{9,88 \cdot 10^6}{150 + \frac{2}{3} \cdot 10} \approx 62930 \text{ Н}.$$

Требуемая длина горизонтального шва при  $K = 10$  мм определяется по формуле

$$a = \frac{F_r}{[\tau'] \beta \cdot K} = \frac{62930}{104 \cdot 0,8 \cdot 10} \approx 77 \text{ мм}.$$

Из конструктивных соображений принимаем  $a = 85$  мм.

Пример 5.

Сварной кронштейн (рис.74) прикреплен к бетонной стене. Детали кронштейна выполнены из стали Ст3, сварены угловым швом с катетом шва  $K = 5$  мм. Сварка ручная электродом обычного качества. Кронштейн нагружен постоянной силой  $F = 10000$  Н. Размеры:  $L = 200$  мм;  $\delta = 20$  мм;  $a = b = 200$  мм;  $c = d = 150$  мм;  $m = n = 100$  мм;  $s = 10$  мм.

Решение.

Положение, форма и размеры опасного сечения. Сварное соединение тавровое, швы угловые, их рассчитывают по условным касательным напряжениям, действующим в биссекторных сечениях швов.

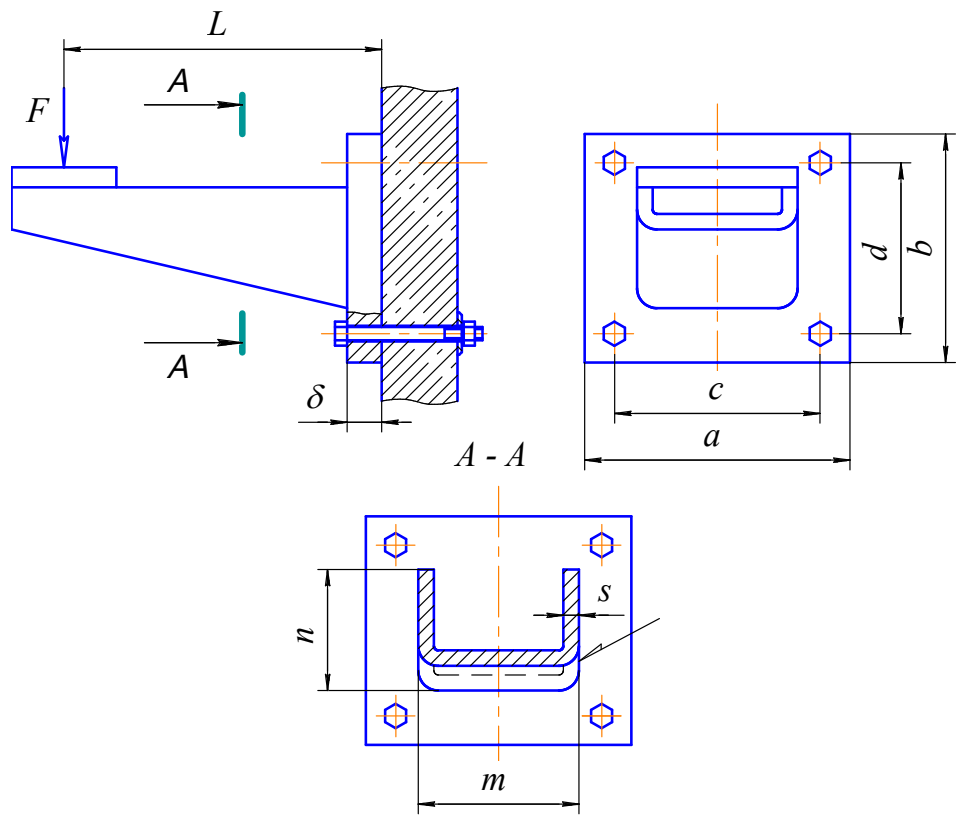
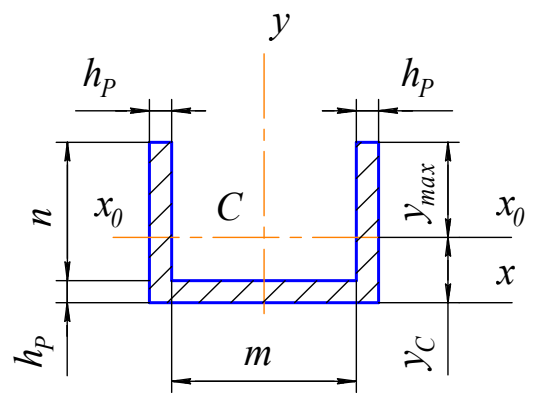


Рис.74. Сварной кронштейн

Расчетное сечение имеет вид



Центр тяжести расчетного сечения (точка *C*) находится на оси симметрии *y – y*, его координата в принятой системе координат *xу*

$$y_c = \frac{S_x}{A_{ш}}$$

где *S<sub>x</sub>* – статический момент расчетного сечения шва относительно оси *x*; *A<sub>ш</sub>* – площадь расчетного сечения шва.

Фигуру, образованную расчетным сечением, разбиваем на три прямоугольника I, II, III с площадями, равными

$$A_I = A_{II} = h_p \cdot (n + h_p) = 0,7 \cdot 5 \cdot (100 + 0,7 \cdot 5) = 362,25 \text{ мм}^2;$$

$$A_{III} = m \cdot h_p = 100 \cdot 0,7 \cdot 5 = 350 \text{ мм}^2.$$

Определяем статические моменты каждого прямоугольника как произведения его площади на координату его центра тяжести

$$S_{x,I} = S_{x,III} = y_{c,I} \cdot A_I = \frac{n + h_p}{2} \cdot A_I = \frac{100 + 0,7 \cdot 5}{2} \cdot 362,25 \approx 18760 \text{ мм}^3;$$

$$S_{x,II} = y_{c,II} \cdot A_{II} = \frac{h_p}{2} \cdot A_{II} = \frac{0,7 \cdot 5}{2} \cdot 350 = 612,5 \text{ мм}^3.$$

Ордината центра тяжести расчетного сечения равна

$$y_c = \frac{S_x}{A_{\Sigma}} = \frac{S_{x,I} + S_{x,II} + S_{x,III}}{A_I + A_{II} + A_{III}} = \frac{2 \cdot 18760 + 612,5}{2 \cdot 362,25 + 350} \approx 35,5 \text{ мм},$$

Определяем силовые факторы, действующие на сварное соединение. При параллельном переносе силы  $F$ , действующей на кронштейн, в центр тяжести расчетного сечения (рис.75) получим поперечную силу  $Q = F = 10$  кН и изгибающий момент  $M = F \cdot (L - \delta) = 10 \cdot (200 - 20) = 1800$  кН·мм.

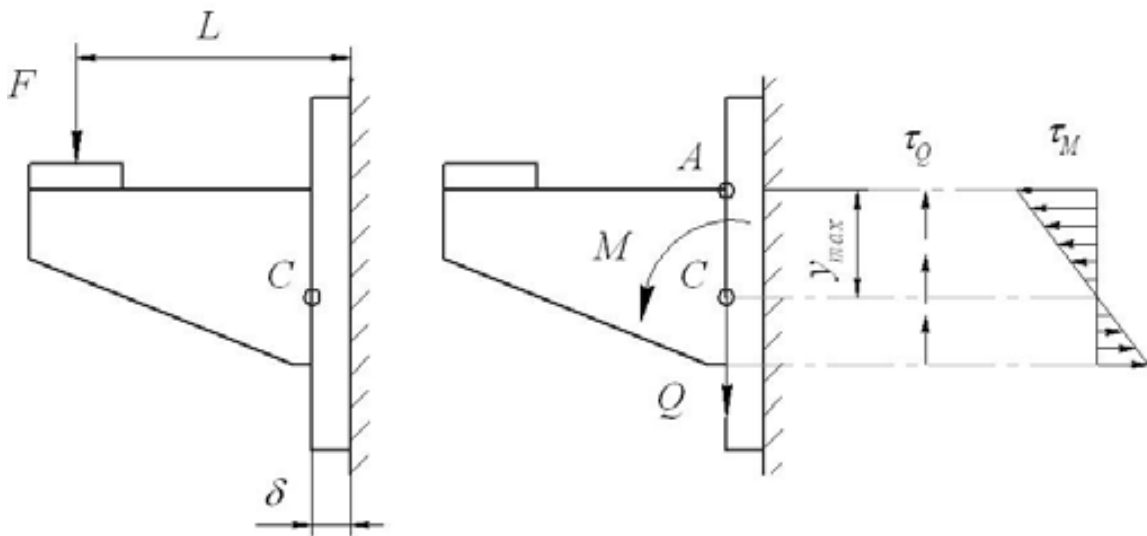


Рис.75. Определение усилий, действующих на сварное соединение

Напряжения в расчетном сечении:

а) напряжения от поперечной силы распределены равномерно по сечению и равны

$$\tau_Q = \frac{Q}{A_{\Sigma}} = \frac{10000}{1074,5} \approx 9,3 \text{ МПа};$$

б) максимальные напряжения от изгибающего момента  $M$ , действующие в точке  $A$ , равны

$$\tau_M = \frac{M}{W_X},$$

где  $W_X$  – осевой момент инерции площади расчетного сечения относительно центральной оси сечения  $x_0$ .

Осевой момент инерции площади расчетного сечения относительно оси  $x_0$  определяем аналогично определению статического момента сечения.

Осевые моменты инерции рассматриваемых прямоугольников относительно своих центральных осей, параллельных оси  $x_0$ , равны

$$I_I = I_{III} = \frac{h_p \cdot (n + h_p)^3}{12} = \frac{0,7 \cdot 5 \cdot (100 + 0,7 \cdot 5)^3}{12} \approx 3,234 \cdot 10^5 \text{ мм}^4;$$

$$I_{II} = \frac{m \cdot h_p^3}{12} = \frac{100 \cdot (0,7 \cdot 5)^3}{12} \approx 357,3 \text{ мм}^4.$$

Осевые моменты этих прямоугольников относительно оси  $x_0$  находим, используя формулу преобразования моментов инерции при параллельном переносе осей,

$$I_{x_{0,I}} = I_{x_{0,III}} = I_I + A_I \cdot \left( \frac{n + h_p}{2} - y_C \right)^2 =$$

$$= 3,234 \cdot 10^5 + 362,25 \cdot \left( \frac{100 + 0,7 \cdot 5}{2} - 35,5 \right)^2 \approx 4,191 \cdot 10^5 \text{ мм}^4;$$

$$I_{x_{0,II}} = I_{II} + A_{II} \cdot (y_C - 0,5 \cdot h_p)^2 = 357,3 + 350 \cdot (35,5 - 0,5 \cdot 0,7 \cdot 5)^2 \approx 4,37 \cdot 10^5 \text{ мм}^4$$

Осевой момент инерции площади расчетного сечения относительно оси  $x_0$  будет равен

$$I_{x_0} = 2 \cdot I_{x_{0,I}} + I_{x_{0,II}} = 2 \cdot 4,191 \cdot 10^5 + 4,37 \cdot 10^5 \approx 12,75 \cdot 10^5 \text{ мм}^4.$$

Осевой момент сопротивления сечения равен

$$W_{x_0} = \frac{I_{x_0}}{y_{max}} = \frac{12,75 \cdot 10^5}{35,5} \approx 3,59 \cdot 10^4 \text{ мм}^3.$$

Напряжения в точке  $A$  от момента  $M$  равны

$$\tau_M = \frac{M}{W_{x_0}} = \frac{1800 \cdot 10^3}{3,59 \cdot 10^4} \approx 50,1 \text{ МПа}.$$

Результирующие напряжения в опасной точке  $A$  равны

$$\tau_{\Sigma} = \sqrt{\tau_Q^2 + \tau_M^2} = \sqrt{9,3^2 + 50,1^2} \approx 51 \text{ МПа.}$$

Допускаемое напряжение для сварного шва. Для стали Ст3 предел текучести  $\sigma_T = 220$  МПа. Допускаемое напряжение на растяжение для основного металла

$$[\sigma]_P = \sigma_T / [n] = 220/1,5 = 147 \text{ МПа.}$$

Так как сварка ручная, электрод обычного качества, то

$$[\tau'] = 0,6 \cdot [\sigma]_P = 0,6 \cdot 147 \approx 88 \text{ МПа.}$$

Следовательно, условие прочности для сварных швов выполняется, так как

$$\tau_{\Sigma} = 51 < 88 = [\tau'].$$

Пример 6.

Рассчитать сварное соединение двутавровой балки с колонной (рис.76), нагруженное силой  $F = 10$  кН. Размер  $L = 1000$  мм. Балка изготовлена из стали Ст3. Допускаемое напряжение при растяжении  $[\sigma]_P = 160$  МПа.

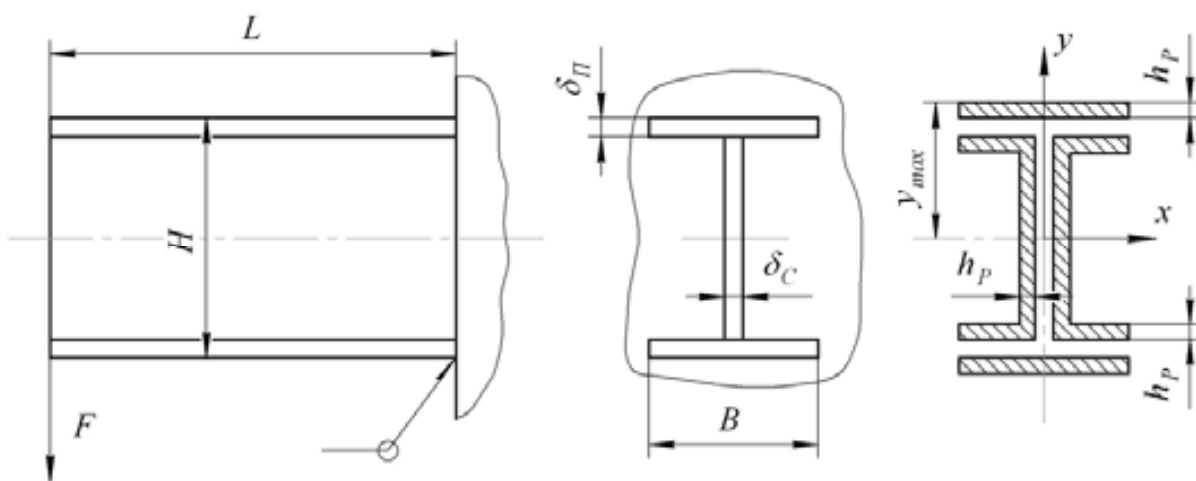


Рис. 76. Соединение двутавровой балки с колонной

Решение.

Определяем сечение двутавровой балки по условию ее прочности

$$\sigma = \frac{M}{W_x} \leq [\sigma]_P,$$

где  $M$  – изгибающий момент в поперечном сечении балки в месте ее заделки, равный  $M = F \cdot L = 10 \cdot 1000 = 1 \cdot 10^4$  кН·мм;  $W_x$  – осевой момент сопротивления сечения балки относительно оси  $x$ .

Пренебрегая касательными напряжениями от поперечной силы, находим  $W_X$ :

$$W_X = \frac{M}{[\sigma]_p} = \frac{1 \cdot 10^7}{160} = 62500 \text{ мм}^3.$$

По найденной величине  $W_X$  выбираем двутавр № 14, для которого  $W_X = 81700 \text{ мм}^3$ .

Для него имеем:  $H = 140 \text{ мм}$ ,  $B = 73 \text{ мм}$ ,  $\delta_{II} = 7,5 \text{ мм}$ ,  $\delta_C = 4,9 \text{ мм}$ . Площадь поперечного сечения балки  $A = 1,74 \cdot 10^3 \text{ мм}^2$ .

Принимаем катет шва  $K = 5 \text{ мм}$ . В шве возникают напряжения от поперечной силы  $Q = F$  и от изгибающего момента  $M$ . Напряжения от поперечной силы  $Q$  равны

$$\tau_Q = \frac{Q}{A_{ш}} \approx \frac{Q}{4 \cdot B \cdot \beta \cdot K + 2 \cdot H \cdot \beta \cdot K} = \frac{10000}{0,7 \cdot 5 \cdot (4 \cdot 73 + 2 \cdot 140)} \approx 5 \text{ МПа}.$$

Максимальные напряжения от изгибающего момента равны

$$\tau_M = \frac{M}{W_{ш}},$$

где  $W_{ш}$  – осевой момент сопротивления расчетного сечения шва относительно оси  $x$ , равный

$$W_{ш} = \frac{I_{ш}}{y_{max}};$$

$I_{ш}$  – осевой момент инерции расчетного сечения шва относительно оси  $x$ ;

$y_{max}$  – расстояние от оси  $x$  до наиболее удаленной от нее точки сечения шва,

$y_{max} = H/2 + h_p = 140/2 + 0,7 \cdot 5 = 73,5 \text{ мм}$ .

Осевой момент инерции расчетного сечения шва равен

$$\begin{aligned} I_{ш} = & 2 \cdot \left[ \frac{B \cdot h_p^3}{12} + B \cdot h_p \cdot \left( \frac{H + h_p}{2} \right)^2 \right] + 4 \cdot \left[ \frac{0,5(B - \delta_C) \cdot h_p^3}{12} + \right. \\ & \left. + 0,5(B - h_p) \cdot h_p \cdot \left( \frac{H - h_p}{2} - \delta_{II} \right)^2 \right] = 2 \cdot \left[ \frac{73 \cdot 3,5^3}{12} + \right. \\ & \left. + 73 \cdot 3,5 \cdot \left( \frac{140 + 3,5}{2} \right)^2 \right] + 4 \cdot \left[ \frac{0,5(73 - 4,9) \cdot 3,5^3}{12} + \right. \\ & \left. + 0,5(73 - 3,5) \cdot 3,5 \cdot \left( \frac{140 - 3,5}{2} - 7,5 \right)^2 \right] \approx 4,547 \cdot 10^6 \text{ мм}^4. \end{aligned}$$

Таким образом,  $W_{ш} = I_{ш} / y_{max} = 4,547 \cdot 10^6 / 73,5 \approx 61864 \text{ мм}^3$ .

Максимальные напряжения от изгибающего момента равны

$$\tau_M = \frac{1 \cdot 10^7}{61864} \approx 162 \text{ МПа.}$$

Результирующее напряжение в опасной точке сечения равно

$$\tau_\Sigma = \sqrt{\tau_M^2 + \tau_Q^2} = \sqrt{162^2 + 5^2} \approx 162 \text{ МПа.}$$

Допускаемое напряжение равно

$$[\tau'] = 0,6 [\sigma]_p = 0,6 \cdot 160 = 96 \text{ МПа.}$$

Так как допускаемое напряжение оказалось меньше расчетного напряжения, то условие прочности не выполняется. Поэтому необходимо выбрать швеллер большего номера и провести перерасчет.

Пример 7.

Полоса соединена с косынкой контактной точечной электросваркой (рис.77). Выполнить расчёт на прочность полосы и сварного шва. Исходные данные:  $F = 25$  кН,  $s = 4$  мм, сталь марки 10Г2, предел текучести  $\sigma_T = 250$  МПа. Требуется определить: ширину  $B$  сечения полосы, диаметр  $d$ , шаг  $t$ , количество  $i$  сварных точек, перекрытие  $c$  соединяемых элементов.

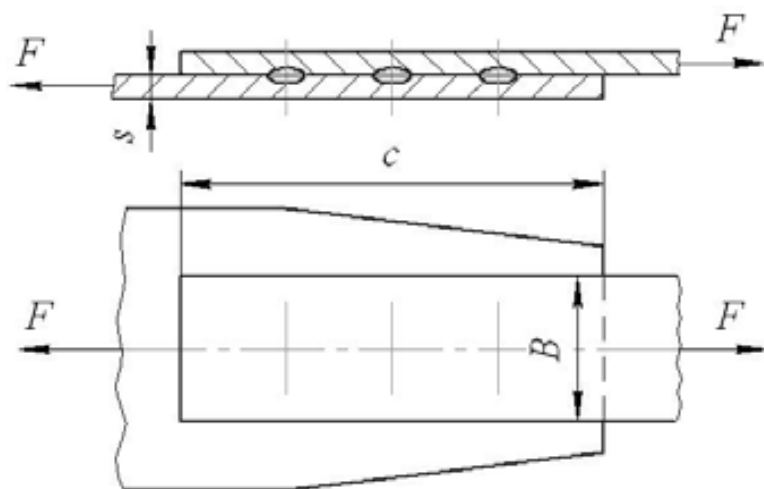


Рис. 77. Соединение полосы с косынкой точечной электросваркой

Условие прочности полосы при растяжении

$$\sigma = \frac{F}{A} \leq [\sigma]_p.$$

Площадь поперечного сечения тяги  $A = B \cdot h$ .

Допускаемые напряжения растяжения для материала полосы



$$[\sigma]_p = \frac{\sigma_T}{[n]} = \frac{250}{1,6} \approx 156 \text{ МПа.}$$

Ширина сечения полосы из условия прочности

$$b \geq \frac{F}{s \cdot [\sigma]_p} = \frac{25 \cdot 10^3}{4 \cdot 156} \approx 40 \text{ мм.}$$

Диаметр сварных точек при толщине соединяемых элементов  $s > 3$  мм

$$d = 1,5s + 5 = 1,5 \cdot 4 + 5 = 11 \text{ мм.}$$

Расстояние от оси сварных точек до кромки полосы в направлении, перпендикулярном действию нагрузки

$$t_2 = 1,5 \cdot d = 1,5 \cdot 11 = 16,5 \text{ мм.}$$

Ширина сечения полосы из условия размещения сварных точек

$$B = 2 \cdot t_2 = 2 \cdot 16,5 = 33 \text{ мм.}$$

Принимаем  $B = 34$  мм по ГОСТ 6636-69, тогда  $t_2 = 17$  мм.

Расчет сварного шва.

Условия прочности сварного шва при односрезном соединении

$$\tau = \frac{4F}{i \pi d^2} \leq [\tau']_{CP}.$$

Допускаемые напряжения среза в сварных швах, выполненных контактной точечной электросваркой

$$[\tau']_{CP} = 0,5 \cdot [\sigma]_p = 0,5 \cdot 156 = 78 \text{ МПа.}$$

Количество сварных точек из условия прочности

$$i \geq \frac{4F}{\pi d^2 [\tau']_{CP}} = \frac{4 \cdot 25 \cdot 10^3}{3,14 \cdot 11^2 \cdot 78} \approx 3,4.$$

Принимаем  $i = 4$ .

Шаг сварных точек при сварке двух элементов

$$t = 3d = 3 \cdot 11 = 33 \text{ мм.}$$

Расстояние от оси сварных точек до кромки соединяемого элемента в направлении действия нагрузки

$$t_1 = 2d = 2 \cdot 11 = 22 \text{ мм.}$$

Перекрытие соединяемых элементов определяем конструктивно

$$c = (i - 1) t + 2 t_1 = (4 - 1) \cdot 33 + 2 \cdot 22 = 143 \text{ мм.}$$

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Расчет сварных соединений и конструкций. Примеры и задачи. Серенко А.Н., Крумбольт М.Н., Багрянский К.В. – Киев: Издательское объединение «Вища школа», 1977. - 336 с.

Проектирование сварных конструкций в машиностроении / под ред. С.А. Куркина. – М.: Машиностроение. 1975. - 376 с.

Николаев Г.А., Винокуров В.А. Сварные конструкции. Расчет и проектирование: учебник для вузов / под ред. Г.А. Николаева. – М.: Высш. шк., 1990. – 446 с.

Краткий справочник конструктора нестандартного оборудования. В 2 т. / В.И. Бакуменко, В.А. Бондаренко, С.Н. Косоруков и др.; под общ. ред. В.И. Бакуменко. – М.: Машиностроение, 1997. Т.1 – 544 с.

Гусева Т.И. Расчет и проектирование сварных конструкций. Курсовое проектирование: учебное пособие для студентов машиностроительных техникумов и колледжей по специальности «Технология сварочного производства». – СПб.: Политехника, 1994. – 208 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ.....	4
2. СУЩНОСТЬ ПРОЦЕССА СВАРКИ.....	5
3. КЛАССИФИКАЦИЯ СВАРКИ.....	8
4. ОСНОВНЫЕ СПОСОБЫ СВАРКИ.....	9
5. ВИДЫ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И ШВОВ.....	31
6. ОФОРМЛЕНИЕ ЧЕРТЕЖЕЙ СВАРНЫХ ИЗДЕЛИЙ.....	48
7. РАСЧЕТЫ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ПРОЧНОСТЬ.....	56
7.1. Расчет сварных соединений со стыковыми швами.....	58
7.2. Расчет соединений с угловыми швами.....	60
7.3. Расчет соединений, выполненных точечной сваркой.....	75
7.4. Расчет сварных соединений при переменных нагрузках.....	81
8. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ.....	83
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	97