

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА»  
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

## СВАРИВАЕМОСТЬ СТАЛЕЙ

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева» в качестве методических указаний для обучающихся Самарского университета по основным образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 24.03.04 Авиастроение, 27.03.02 Управление качеством, 15.03.01 Машиностроение, 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств и по специальности 24.05.07 Самолето - и вертолестроение, 24.05.01 Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов

Составители: *Ю. А. Вашуков,*  
*Г. И. Рыжов*

САМАРА  
Издательство Самарского университета  
2026

УДК 621.791.011:669.14(075)

ББК К641-17,27я7

С240

Рецензент д-р техн. наук, доц. Е. А. Н о с о в а

С240 **Свариваемость сталей:** методические указания /

Составители: *Ю. А. Ваиуков, Г. И. Рыжов.* – Самара: Издательство

Самарского университета, 2026. – 24 с.

В работе даны практические рекомендации по определению свариваемости сталей. Представлены основные технологические мероприятия, применяемые при сварке различных марок сталей.

Методические указания предназначены для обучающихся всех форм обучения института авиационной и ракетной техники, изучающих дисциплины, связанные со сборочно-сварочными процессами.

Разработаны на кафедре производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении Самарского университета.

УДК 621.791.011:669.14(075)

ББК К641-17,27я7

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВАРИВАЕМОСТИ СТАЛЕЙ И ЕЕ ГРУППЫ .....	5
2 ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ И СТРУКТУРЫ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ СВАРИВАЕМОСТЬ СТАЛЕЙ .....	7
3 ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ СТАЛЕЙ .....	10
3.1 Сварка аустенитных сталей .....	10
3.2 Сварка аустенитно-ферритных сталей .....	12
3.3 Сварка аустенитно-мартенситных сталей .....	14
3.4 Сварка мартенситных сталей .....	15
3.5 Сварка мартенсито-ферритных сталей .....	16
3.6 Сварка ферритных сталей .....	17
3.7 Сварка феррито-мартенситных сталей .....	19
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	22

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных при сварке сталей является вопрос сопротивляемости образованию трещин. Зона сварки подвергается сильному и неравномерному нагреву. Температура изменяется от температуры расплавленного металла до температуры окружающей среды в сравнительно узком диапазоне, как по длине, так и ширине деталей (градиент температуры – сотни и даже тысячи градусов на миллиметр). Последующее охлаждение зоны сварки происходит очень быстро за счет высокой теплопроводности металлов. Перепады температуры в зоне сварки вызывают неравномерное тепловое расширение одних участков и сжатие других, что приводит к значительным внутренним напряжениям и, как следствие – к деформации деталей и образованию трещин.

Свариваемость зависит, с одной стороны, от материала, технологии сварки, конструктивного оформления соединений, с другой - от требуемых эксплуатационных свойств сварной конструкции. Эксплуатационные свойства сварных конструкций определяются предъявляемыми к ним техническими требованиями. Если требования к эксплуатационным свойствам сварных соединений с принятыми допущениями удовлетворяются, то свариваемость материалов считается достаточной. Если не обеспечивается минимальный уровень, хотя бы одного из эксплуатационных свойств сварного соединения, то свариваемость материала считается недостаточной.

Целью работы является:

- оценка свариваемости стали;
- оценка склонности стали к появлению горячих и холодных трещин;
- определение структуры стали;
- определение необходимых технологических мероприятий при разработке технологического процесса сварки.

## 1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВАРИВАЕМОСТИ СТАЛЕЙ И ЕЕ ГРУППЫ

*Свариваемостью называют способность металлов образовывать сварные соединения без трещин и прочих дефектов, имеющие механические и физико-химические свойства, близкие к свойствам основного металла.*

Различают трещины горячие, возникающие при температуре близкой к температуре кристаллизации, и холодные, появляющиеся при более низкой температуре.

*Горячие трещины* чаще всего возникают при ослаблении деформационной способности металла из-за появления в структуре легкоплавких хрупких эвтектик, дефектов кристаллического строения, внутренних и внешних напряжений.

Вероятность появления при сварке горячих трещин можно определить по показателю Уилкинсона:

$$H.C.S. = \frac{C \cdot (S + P + \frac{Si}{25} + \frac{Ni}{100})}{3Mn + Cr + Mo + V} \cdot 10^3, \quad (1)$$

где C, S, P, Si, Ni, Mn, Cr, Mo, V – массовые доли углерода, серы, фосфора, кремния, никеля, марганца, хрома, молибдена, ванадия, %.

Условием появления горячих трещин является  $H.C.S. > 2$ . Так, например, при обычной сварке низколегированной стали трещины начинают возникать при  $H.C.S. = 4$ .

*Холодные трещины* чаще всего возникают из-за закаливваемости стали при быстром охлаждении и насыщении металла шва и зоны термического влияния водородом. Они, как правило, зарождаются по истечении некоторого времени после сварки и развиваются в течение нескольких часов или даже суток.

Для оценки склонности металла к появлению холодных трещин чаще всего используется углеродный эквивалент  $C_3$ , которым можно пользоваться как показателем, характеризующим свариваемость, при предварительной оценке последней.

$$C_3 = C + \frac{Mn}{600} + \frac{Cr}{500} + \frac{V}{500} + \frac{Mo}{400} + \frac{Ni}{1500} + \frac{Cu}{1300} + \frac{P}{2}, \quad (2)$$

По свариваемости (ГОСТ 29273–92) стали разделяют на четыре группы.

I группа – хорошо сваривающиеся стали ( $C_3$  менее 0,25%). Это стали, для которых обеспечивается равнопрочность сварного шва и основного металла без применения специальных технологических приемов в широком диапазоне режимов сварки.

II группа – удовлетворительно сваривающиеся стали ( $C_3$  в пределах 0,25 ... 0,35%). К удовлетворительно свариваемым относятся стали, для которых равнопрочность обеспечивается при использовании специальных технологических приемов (предварительный подогрев, последующая термообработка, точное соблюдение термического цикла). После сварки конструкции целесообразно термообработать, особенно толстостенные.

III группа – ограниченно сваривающиеся стали ( $C_3$  в пределах 0,35 ... 0,45%). Эти стали для обеспечения качественного шва требуют подогрева деталей перед сваркой и термической обработки после сварки.

IV группа – плохо, сваривающиеся стали ( $C_3$  более 0,5%). Это стали, для которых достичь равнопрочности шва и основного металла при существующем уровне технологии не удастся.

## 2 ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ И СТРУКТУРЫ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ СВАРИВАЕМОСТЬ СТАЛЕЙ

Из основных химических элементов, входящих в состав сталей, наибольшее влияние на образование трещин оказывает углерод.

С увеличением содержания углерода возрастают твердость, пределы прочности и текучести; уменьшаются относительное удлинение, ударная вязкость и трещиностойкость. Вследствие этого углерод при содержании в стали до 0,25% не ухудшает свариваемости. При более высоком содержании свариваемость резко ухудшается, так как в зоне термического влияния образуются закалочные структуры, приводящие к трещинам. Применение среднеуглеродистых и высокоуглеродистых присадочных материалов приводит к пористости шва.

Легирующие элементы по-разному влияют на свариваемость стали.

*Карбидообразующие элементы* – элементы, обладающие химическим сродством к углероду и образующим с ним карбиды. Эти элементы способствуют появлению закалочных структур и повышенному риску трещинообразования в сварном шве и в околошовной зоне. К карбидообразующим элементам относятся титан, марганец, хром, молибден, ванадий, ниобий.

*Графитизирующие элементы* – это элементы, которые не образуют карбидов. К графитизирующим элементам относятся кремний и никель.

Кремний дегазирует сталь, повышает ее плотность и предел текучести. Никель увеличивает пластические и прочностные свойства стали, измельчает зерна, не ухудшает свариваемость.

Вредные примеси (фосфор, сера, кислород, азот, водород), находящиеся даже в небольших количествах, значительно снижают свариваемость стали. Повышенное содержание "S" приводит к обра-

зованию горячих трещин – красноломкость, а "Р" вызывает хладноломкость.

Существует несколько типов структурных диаграмм, с помощью которых можно выбрать оптимальное сочетание легирующих элементов, обеспечивающее получение заданной структуры. Наиболее широко используется диаграмма Шеффлера (Рис.1).

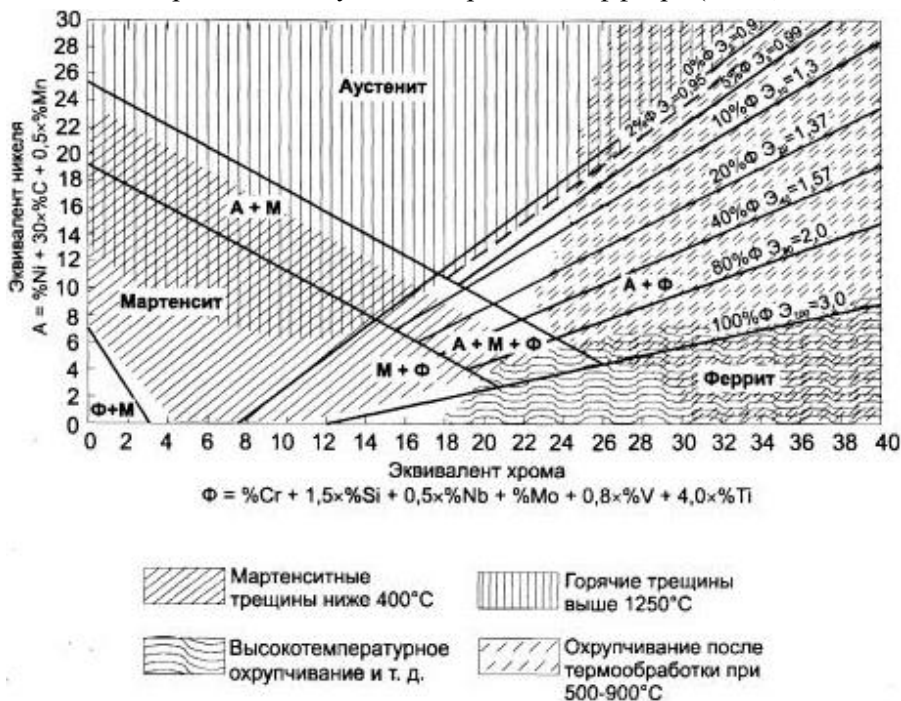


Рисунок 1 – Диаграмма Шеффлера

По оси абсцисс в диаграмме отложена концентрация ферритообразующих элементов ( $E_{Cr}$ ), а по оси ординат – концентрация аустенитообразующих элементов ( $E_{Ni}$ ).

$$E_{Ni} = [\%Ni] + [\%Co] + 30[\%C] + 0,5[\%Mn] + 30[\%N] + 0,3[\%Cu];$$

$$E_{Cr} = [\%Cr] + [\%Mo] + 1,5 \cdot [\%Si] + 0,5 \cdot [\%Nb],$$

где цифры, стоящие перед концентрацией элементов, показывают эффективность их взаимодействия на соответствующую

структурную составляющую по сравнению с никелем и хромом.

По диаграмме Шеффлера определяют к какому структурному классу относится конкретная сталь. Таким образом, для получения заданной структуры стали можно, исходя из наличия легирующих элементов, подобрать необходимый легирующий комплекс.

Отрицательное влияние на технологическую свариваемость могут оказать следующие явления:

1. Образование кристаллизационных (горячих) и закалочных (холодных) трещин.
2. Образование хрупких участков в металле шва и зоне термического влияния.
3. Окисление металла шва и другие процессы.

Для предупреждения или ослабления влияния этих явлений требуется применение специальных технологических мер (приемов). Основными технологическими мероприятиями, применяющимися при сварке сталей, являются следующие:

1. Предварительный и сопутствующий подогрев свариваемых кромок
2. Уменьшение содержания углерода в сварном шве.
3. Рациональный выбор сварочных материалов.
4. Рациональный выбор режимов сварки.
5. Технологические приемы сварки.
6. Уменьшение содержания водорода в шве и околшовной зоне.
7. Термообработка сварного шва.

## 3 ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ СТАЛЕЙ

### 3.1 Сварка аустенитных сталей

Стали аустенитного класса имеют высокое содержание хрома (более 14–16 %) и никеля (более 7 %). Они характеризуются высокой коррозионной стойкостью, жаропрочностью, жаростойкостью.

Свариваемость аустенитных сталей осложняется из-за многокомпонентного легирования, которое приводит к образованию горячих и холодных трещин в швах и околошовных зонах. Холодные трещины образуются в процессе остывания сварных швов в интервале температур 500–700 °С, а также при комнатной температуре спустя некоторое время после сварки. Холодные трещины имеют внутрикристаллитный характер, очагами их образования могут быть горячие трещины. Обладая хорошей общей коррозионной стойкостью, аустенитные стали склонны к межкристаллитной коррозии, которая развивается в металле шва, по линии сплавления и на определенном участке зоны термического влияния.

На свариваемость аустенитных сталей значительное влияние также оказывают их теплофизические свойства: низкий коэффициент теплопроводности, высокий коэффициент линейного расширения, высокое удельное электросопротивление.

Низкий коэффициент теплопроводности приводит к увеличению глубины проплавления основного металла, а с учетом повышенного коэффициента теплового расширения возрастает и коробление изделий. Для уменьшения коробления изделий аустенитных сталей следует применять способы и режимы сварки, характеризующиеся максимальной концентрацией тепловой энергии.

Более высокое удельное электросопротивление, примерно в пять раз выше, чем у углеродистых сталей, обуславливает большой разогрев сварочной проволоки в вылете электрода или металлического стержня электрода для ручной дуговой сварки. При автоматической и полуавтоматической дуговой сварке следует умень-

шать вылет электрода и повышать скорость его подачи. При ручной дуговой сварке уменьшают длину электродов и допустимую плотность сварочного тока.

Наличие брызг на основном металле, а также следов касания дугой является недопустимым, так как в этих зонах образуются микротрещины. Поэтому перед сваркой около разделки кромок накладывают теплоизоляцию или наносят меловую эмульсию. Корневой шов нельзя сваривать без защиты, потому что при этом возрастает количество окисных включений, пор и горячих трещин. Корневой шов с обратной стороны шва защищают путем нанесения на свариваемые кромки специальных флюсов-паст или поддувом защитного газа.

Особенности технологии сварки аустенитных сталей:

- сварка должна проводиться так, чтобы минимизировать локальный нагрев, так как он может вызвать хрупкость и образование трещин;

- сварку осуществляют на постоянном токе обратной полярности короткой дугой без поперечных колебаний;

- в процессе сварки используют электроды и проволоки с высоким содержанием никеля, чтобы поддерживать стабильную аустенитную структуру шва;

- обязательная прокалка электродов и тщательное удаление влаги;

- для сохранения коррозионной стойкости и предотвращения охрупчивания необходима термическая обработка после сварки.

- при сварке следует применять режимы, уменьшающие долю основного металла в шве.

Для аустенитных сталей основным видом термической обработки является закалка при  $T = 1050...1100$  °С, выдержка 1,0...1,5 мин на 1 мм толщины стали с последующим охлаждением в воде или на воздухе, а также:

- стабилизирующий отжиг при 850...950 °С для полного снятия остаточных напряжений;
- двухступенчатый отжиг ( 900 °С – 10 ч. + 750 °С – 30 ч) для жаропрочных термоупрочняемых сталей;

### **3.2 Сварка аустенитно-ферритных сталей**

Аустенитно-ферритные стали имеют относительно высокие пределы текучести и прочности при удовлетворительных пластичности и ударной вязкости, а также высокую коррозионную стойкость и хорошую свариваемость. Пределы текучести и прочности при достаточно высокой пластичности и вязкости шва достигают максимума при равном процентном содержании в нем аустенитной и ферритной фаз. Изменение содержания ферритной фазы в шве за счет легирования или термообработки приводит к существенному изменению его механических свойств. При соотношении аустенитной и ферритной фаз, близком к единице, швы стойки, как против межкристаллитной, так и против структурно-избирательной коррозии. При уменьшении количества аустенитной фаз в шве или околошовной зоне до 20 % и менее в металле проявляется склонность к межкристаллитной коррозии.

Аустенитно-ферритные стали теряют вязкость при нагреве их в интервале температур 450–650 °С. Это связано с тем, что хрупкость, обусловленная выделением карбидов, усиливается действием, так называемой 475° хрупкости. В связи с этим особое внимание при их сварке необходимо обращать на строгое соблюдение режимов сварки и охлаждения изделий. Кроме того, аустенитно-ферритные стали отличаются повышенной склонностью к росту зерна в зоне термического влияния при воздействии сварочного термического цикла.

Основные рекомендации сварки включают:

- сварка проводится на постоянном токе обратной полярности;

- для сварки сталей обычно используют присадки, близкие по составу к основному металлу. Важно выбрать такой материал, чтобы он обеспечивал сохранение баланса фаз после сварки и предотвращал появление хрупких интерметаллических фаз. При выборе присадочного материала необходимо стремиться обеспечить равенство не только механических свойств шва, основного металла и стойкость шва против межкристаллитной коррозии, но и равенство общей коррозионной стойкости металла всех зон сварного соединения;

- выбор скорости охлаждения для сохранения баланса фаз, предотвращения роста зерна и образования нежелательных структур и хрупких интерметаллических соединений;

- рекомендуется избегать длительного нагрева и перегрева зоны термического влияния (ЗТВ). Предпочтительными являются способы сварки с невысокими погонными энергиями с минимальным тепловложением.

- использование предварительного подогрева. Оптимальная температура составляет 100–150°C.

Для восстановления исходного баланса фаз и улучшения коррозионной стойкости после сварки проводится термообработка, в качестве которой обычно применяют отпуск при температуре 950–1100°C с последующим быстрым охлаждением.

Контроль качества сварных швов должен включать визуальный осмотр, рентгенографию, ультразвуковой контроль и механические испытания. Также могут проводиться специальные тесты на коррозионную стойкость, такие как тест на стойкость к межкристаллитной коррозии.

### 3.3 Сварка аустенитно-мартенситных сталей

К аустенитно-мартенситному классу в соответствии с ГОСТ 5632–72 относятся стали, имеющие структуру аустенита и мартенсита, количество которых можно изменить в широких пределах.

Влияние термического цикла сварки приводит к структурным изменениям, приводящим к охрупчиванию металла ЗТВ сталей, а также снижению их коррозионной стойкости и стойкости против межкристаллитной коррозии.

Основные рекомендации сварки включают:

- выбор подходящих сварочных материалов (аустенитные или аустенитно-ферритные электроды), чтобы обеспечить свойства металла шва;

- использование сварочных материалов, совместимых с основным металлом, чтобы избежать нежелательных структурных изменений и предотвращения образования горячих трещин;

- строгий контроль температуры во время и после сварки;

- наиболее предпочтительные способы сварки с низкими погонными энергиями (например, TIG-сварка или контактная точечная сварка);

- сварка осуществляется на постоянном токе обратной полярности;

- правильная сушка электродов и очистка свариваемых поверхностей для снижения содержания углерода и предотвращения холодных трещин;

- предварительный нагрева с температурой 200–400°C;

- контроль температуры между проходами;

- обеспечение медленного охлаждения до 1020°C после сварки;

Структура и свойства аустенитно-мартенситных сталей могут изменяться в зависимости от термического цикла сварки. При изготовлении ответственных конструкций, к которым предъявляются требования высокой прочности, вязкости и коррозионной стойкости сварных соединений, целесообразно предусмотреть полный

цикл термообработки, включающий закалку ( $T=975-1050^{\circ}\text{C}$ ), обработку при температуре  $70^{\circ}\text{C}$  и отпуск ( $T=200-450^{\circ}\text{C}$ ). Режим термообработки в этом случае выбирают аналогичным термообработке основного металла.

### 3.4 Сварки мартенситных сталей

К мартенситным относятся стали с содержанием  $C_{г} = 11...12$  %, дополнительно легированные Ni и другими элементами. Содержание углерода в мартенситных сталях ограничивают до 0,20 %, что обеспечивает достаточную пластичность и ударную вязкость ответственных деталей.

Основная трудность при сварке сталей мартенситного класса - обеспечить стойкость металла шва и, в особенности, околошовной зоны к образованию горячих и холодных трещин. При сварке многослойных швов могут образовываться поперечные трещины, пересекающие металл шва и металл околошовной зоны, а также внутренние продольные трещины металла корневых швов.

Эквивалентное содержание углерода влияет на критическое содержание водорода в металле. Чем выше содержание углерода и других элементов, понижающих температуру мартенситного превращения, тем при меньшем содержании водорода образуются трещины.

Особенности сварки мартенситных сталей:

1. Для сварки мартенситных сталей применяют электроды, стержни и покрытия которых обеспечивают получение наплавленного металла, близкого по химическому составу к основному металлу;

2. Сварку выполняют на постоянном токе обратной полярности.

3. Минимальное содержание водорода в сварном шве обеспечивается за счет обязательной прокалки электродов и флюсов, осушения защитных газов, тщательной зачистки свариваемых кромок.

4. Для сварки сталей под флюсом применяют малоактивные и даже пассивные безмарганцовистые солеоксидные флюсы.

5. Сварку целесообразно осуществлять с малым тепловложением для уменьшения ЗТВ, понижения склонности к росту зерна. Чем более концентрированный источник тепла применяется при сварке, тем меньше эта склонность к образованию холодных трещин.

6. Устранять жесткие закрепления, обеспечив возможность свободного деформирования свариваемого изделия для снижения напряжений в металле шва.

7. Для предотвращения образования холодных трещин при сварке металла рекомендуется предварительный подогрев. Температура подгрева колеблется от 150 до 500 °С в зависимости от величины  $S_{\text{экр}}$ , конструкции и свариваемой толщины. Время нагрева назначается из расчета 1,5–2 мин на 1 мм толщины соединения. Предварительный подогрев замедляет скорость остывания при температуре ниже 300 °С и способствует более полному удалению водорода из наплавленного металла.

8. Применять колебательные движения электрода при многослойной сварке и импульсные режимы сварочного тока при сварке небольших толщин для обеспечения более равноосной структуры металла шва и предупреждения чрезмерного развития зоны перегрева.

### **3.5 Сварка мартенситно-ферритных сталей**

Хромистые с содержанием хрома 13...14 % стали относятся к мартенситно-ферритным сталям. Эти стали обладают ограниченной свариваемостью. Трудности при сварке мартенситно-ферритных сталей связаны с охрупчиванием металла и возможностью образования холодных трещин (ХТ) в сварном шве и околошовной зоны. ХТ возникают в результате совместного действия нескольких факторов: образование закалочных структур (мартенсита), наличие высоких сварочных напряжений, насыщение сварочной ванны водородом и образование крупнозернистой структуры.

Основными способами предупреждения холодных трещин является применение предварительного и сопутствующего подгре-

ва до 150-450°C. Минимальное содержание водорода в сварном шве обеспечивается за счет обязательной прокалки электродов и флюсов, осушения защитных газов, тщательной зачистки свариваемых кромок. Для снижения напряжений в металле шва и околошовной зоне целесообразно устранять жесткие закрепления, обеспечив возможность свободного деформирования свариваемого изделия, а также избегать наличия концентраторов напряжений. Повышение содержания углерода в сталях, с одной стороны, позволяет улучшить свойства сварного соединения за счет термообработки, а с другой – ухудшает свариваемость из-за охрупчивания зоны термического влияния.

Сварку выполняют при положительной температуре окружающей среды на постоянном токе обратной полярности с малым тепловложением для уменьшения ЗТВ и понижения склонности к росту зерна.

Из-за опасности образования холодных трещин и хрупкого разрушения сварные соединения подвергаются термическому отпуску при температуре 680–720 °С для «смягчения» структур закалки и снятия остаточных напряжений.

### **3.6 Сварка ферритных сталей**

К ферритным относятся стали с содержанием Сг от 15 до 30% при одновременном отсутствии никеля и малом содержании углерода. Стали обладают высокой коррозионной стойкостью в различных агрессивных средах и жаростойкостью до 1000...1100 °С.

Ухудшение свариваемости ферритных сталей связаны с тремя причинами:

- повышенной склонностью к росту ферритного зерна при нагреве в металле шва и особенно интенсивный в околошовной зоне. Рост зерна увеличивается с повышением погонной энергии сварки и

уменьшением тепловой сосредоточенности источника сварочного тепла;

- склонностью металла к охрупчиванию;
- возможностью возникновения межкристаллитной коррозии.

В результате роста зерна снижается прочность и пластичность при комнатных (и более низких) температурах. Следствием интенсивного роста зерна является также снижение ударной вязкости металла под действием высоких температур. Участок с пониженной ударной вязкостью охватывает 2...3 мм, непосредственно примыкающих к линии сплавления и подверженных нагреву выше температуры 1100 °С. Вследствие этого сварное соединение имеет склонность к охрупчиванию при переменных и ударных нагрузках, а также при отрицательных температурах.

Трудности при сварке ферритных сталей связаны также с тем, что в процессе охлаждения в области высоких температур (около 1000<sup>0</sup>С) возможно выпадение карбидов хрома на границах зерен, т. е. происходит местное обеднение твердого раствора хромом. Концентрация хрома в обедненных участках зерна может упасть до 5 %. При работе в коррозионной среде эти участки растворяются, что приводит к нарушению связи между отдельными зернами. Это приводит к межкристаллитной коррозии.

Основными способами предотвращения охрупчивания и образования межкристаллитной коррозии являются:

- создание в шве двухфазной структуры и легирование металла карбидообразующими элементами (Ti, Nb);
- отжиг при  $T = 700...780$  °С в течении 2 часов обеспечивает повышение стойкости против МКК и снижения остаточных напряжений;
- использование предварительного и сопутствующего подогрева свариваемых изделий выше температурного интервала хрупкости (150–180°С);
- уменьшение содержания углерода и азота.

- использование теплового режима сварки, исключающего перегрев металла (сварка с малой погонной энергией, сварка с перерывами, короткими участками, валиками малых сечений);
- проведение сварки с ускоренным охлаждением. Ускоренное охлаждение повышает пластичность и вязкость сталей;
- снижение содержания примесей и остаточных газов.
- применение активирующих флюсов, которые увеличивают глубину проплавления и способствуют сжатию сварочной дуги.

### **3.7 Сварка феррито-мартенситных сталей**

Феррито-мартенситные стали – двухфазные стали, сочетающие свойства ферритных и мартенситных сталей. Основные элементы, входящие в состав феррито-мартенситных сталей:

- хром – основной легирующий элемент, обеспечивает коррозионную устойчивость в агрессивных средах и жаростойкость при высоких температурах.

- кремний – повышает жаростойкость стали (совместно с хромом).

- марганец – устраняет структурные превращения в промежуточной области температур (500–750 °С), которые приводят к охрупчиванию, особенно при сварке.

- цирконий – стабилизирует сталь в момент кристаллизации, образуя мелкодисперсные зародыши кристаллизации, что повышает пластичность стали при деформации в горячем и холодном состоянии.

Основными проблемами при сварке являются:

- образование холодных трещин – вызвано высокой закаливаемостью стали и водородом в металле шва;

- рост зерна в ЗТВ – приводит к снижению ударной вязкости;

- 475-градусная хрупкость – возникает при длительной эксплуатации при 400–550 °С;

- выпадение хрупкой фазы – происходит при 550–850 °С, снижает пластичность;

- межкристаллитная коррозия – возможна в околошовной зоне.

Особенности сварки феррито-мартенситных сталей:

- содержание углерода не должно превышать 0,2 % (иначе возрастает хрупкость мартенсита);

- ванадий и молибден снижают склонность к трещинам, связывая углерод в карбиды;

- погонная энергия – умеренная (снижает рост зерна);

- сварка производится при положительной температуре окружающего воздуха;

- скорость охлаждения – оптимальна в диапазоне 10–100 °C/с (для разных марок);

- охлаждение между валиками до <100 °C (предотвращает перегрев);

- снижение вредных примесей (S, P) улучшает свариваемость;

- использование предварительного подогрева  $T=150-250$  °C;

- использование электродов фтористо-кальциевого типа (снижают водородное охрупчивание);

Основной целью термической обработки является: снятие остаточных напряжений, улучшение структуры металла шва и ЗТВ, восстановление механических свойств и достижение однородности свойств по всему объему конструкции, приближая их к свойствам основного металла, снижение риска водородного растрескивания. Наиболее распространенным видом термообработки феррито-мартенситных сталей является отпуск. Температура отпуска варьируется в широком диапазоне, но обычно находится в пределах 650–780°C. Время выдержки зависит от толщины стенки изделия (обычно 1–2 часа на каждые 25 мм толщины). Охлаждение обычно производится на спокойном воздухе.

## **Порядок выполнения работы**

1. Выбрать марку стали согласно указанного преподавателем варианта и выписать химический состав заданной стали в виде таблицы.
2. Определить классификацию стали по содержанию углерода и легирующих компонентов.
4. Оценить склонность стали к появлению горячих и холодных трещин.
5. Определить группу свариваемости стали.
6. Определить структуру стали, используя диаграмму Шеффлера и записать основные рекомендации для разработки технологического процесса сварки стали.

## **Содержание отчета**

1. Таблица химического состава заданной стали.
2. Расчеты для определения свариваемости стали, оценке склонности стали к появлению горячих и холодных трещин, группы свариваемости и структуры стали.
3. Основные рекомендации для разработки технологического процесса сварки стали.

## **Контрольные вопросы**

1. Дайте определение понятию «свариваемость» материалов.
2. От чего зависит свариваемость материалов?
3. По каким формулам определяется вероятность появления горячих и холодных трещин?
4. Назовите группы свариваемости сталей. В чем их особенность?
5. Назовите основные технологические мероприятия, применяемые при сварке сталей.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Андриюшкин, А. Ю. Производство сварных конструкций в ракетно-космической технике: учебное пособие / А. Ю. Андриюшкин, О. О. Галинская, А. Б. Сигаев. – Санкт-Петербург: БГТУ "Военмех" им. Д.Ф. Устинова, 2015. – 104 с.
2. Зорин, Н. Е. Материаловедение сварки. Сварка плавлением: учебное пособие / Н. Е. Зорин, Е. Е. Зорин. – 3-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2018. – 164 с.
3. Козловский, С. Н. Введение в сварочные технологии: учебное пособие / С. Н. Козловский. – Санкт-Петербург: Лань, 2011. – 416 с.
4. Паршин С. Г. Технология сварки. Сварка плавлением. Технология сварки высоколегированных сталей / С. Г. Паршин. – СПб.: Изд-во политехнического ун-та, 2015. – 102 с.

Методические материалы

## **СВАРИВАЕМОСТЬ СТАЛЕЙ**

*Методические указания*

Составители: ***Вашуков Юрий Александрович,***  
***Рыжов Георгий Игоревич***

Редакционно-издательская обработка  
издательства Самарского университета

Подписано в печать 14.04.2026. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печ. л. 1,5.

Тираж 27 экз. Заказ № . Арт. – 1(МУ)/2026.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»  
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)  
443086, САМАРА, МОСКОВСКОЕ ШОССЕ, 34.

---

Издательство Самарского университета.  
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

