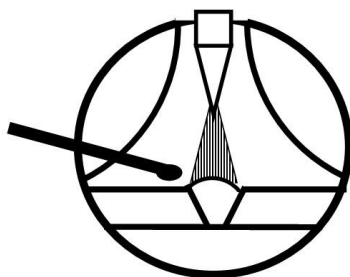


С. Г. Паршин

**ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ.
СВАРКА ПЛАВЛЕНИЕМ.
ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ
ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ**

Учебное пособие



Санкт-Петербург 2015

Паршин С.Г. Технология сварки. Сварка плавлением. Технология сварки высоколегированных сталей / С.Г. Паршин. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2015. – 102 с.

Учебное пособие соответствует программе дисциплины «Технология сварки. Сварка плавлением» учебного плана 22.03.02.05 «Металлургия сварочного производства» федерального образовательного стандарта по направлению подготовки 22.03.02 «Металлургия».

В учебном пособии рассмотрены технологические особенности различных способов сварки плавлением, наплавки и термической резки высоколегированных сталей.

Учебное пособие содержит 102 страницы, 19 рисунков, 45 таблиц и 29 библиографических источников. Учебное пособие предназначено для студентов 3–4 курсов очного и 4–5 курсов заочного обучения по профилю подготовки «Металлургия сварочного производства».

© Паршин С.Г., 2015

© Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет, 2015

ISBN

Оглавление

1. Свариваемость металлов и сплавов	4
1.1. Понятие о свариваемости металлов и сплавов.....	4
1.2. Механизм возникновения холодных трещин.....	5
1.3. Механизм возникновения горячих трещин.....	11
2. Технология сварки высоколегированных сталей	18
2.1. Классификация и свойства сталей мартенситного, мартенситно-ферритного и ферритного класса.....	18
2.2. Диаграммы структурного состояния хромоникелевых сталей.....	25
2.3. Технология сварки сталей мартенситного, мартенситно-ферритного и ферритного класса.....	33
2.4. Технология сварки жаропрочных и коррозионностойких сталей аустенитного класса.....	39
2.5. Технология сварки высокомарганцовистых, высокоазотистых супераустенитных сталей.....	56
2.6. Технология сварки дуплексных ферритно-аустенитных сталей.....	61
2.7. Технология сварки дисперсионно-твердеющих сталей.....	64
2.8. Технология сварки разнородных сталей.....	67
2.9. Сварочные материалы для сварки высоколегированных сталей.....	81
Библиографический список	100

1. Свариваемость металлов и сплавов

1.1. Понятие о свариваемости металлов и сплавов

Металлы и сплавы характеризуются свариваемостью. Под этим термином понимают способность металла образовывать прочное и надежное сварное соединение без дефектов.

Наиболее важные требования при сварке металлов: обеспечение равнопрочности сварного соединения с основным металлом, приближение химического состава шва к составу основного металла, отсутствие дефектов в виде горячих и холодных трещин, газовых пор, шлаковых включений, непроваров, подрезов и других дефектов.

Согласно ГОСТ 29273-92: «Металлический материал считается поддающимся сварке до установленной степени при данных процессах и для данной цели, когда сваркой достигается металлическая целостность при соответствующем технологическом процессе, чтобы свариваемые детали отвечали техническим требованиям, как в отношении их собственных качеств, так и в отношении их влияния на конструкцию, которую они образуют».

Различают физическую и технологическую свариваемость. Физическая свариваемость – это принципиальная возможность металла образовывать неразъемное монолитное соединение с химической связью.

Технологическая свариваемость – это способность металлов под воздействием термомеханического цикла сварки образовывать сварное соединение с заданными механическими, эксплуатационными и специальными свойствами.

1.2. Механизм возникновения холодных трещин

Холодные трещины образуются в сварных соединениях при охлаждении до температуры менее 200 °С. Возникновение ХТ объясняется тем, что при охлаждении металл претерпевает фазовые и структурные превращения, в результате чего возникают растягивающие напряжения. Вероятность появления холодных трещин увеличивается, если металл имеет низкую деформационную способность и малую пластичность. К возникновению холодных трещин особенно склонны легированные стали, способные к образованию закалочной структуры мартенсита, а также титановые сплавы.

Склонность металла к образованию ХТ зависит от химического состава, термомеханического цикла сварки, наличия в металле остаточного диффузионного водорода.

ХТ могут возникать сразу после сварки, через несколько часов и даже недель. Указанные трещины имеют блестящий излом и располагаются в шве и зоне термического влияния.

По расположению ХТ разделяют на поперечные и продольные. Наиболее типичными являются поперечные трещины, которые могут располагаться в сварном шве и околошовной зоне, а также продольные трещины по границе шва (отрывы), по околошовной зоне (отколы). ХТ могут развиваться как по границам зерен, так и по телу зерна. Скорость распространения ХТ может быть медленной, а в некоторых случаях, очень большой.

Согласно исследованиям, появление холодных трещин вызывают следующие причины: увеличение размера аустенитного зерна, наличие растягивающих напряжений I рода, насыщенность металла шва водородом, наличие в микроструктуре шва закалочных структур мартенсита и бейнита. Обработкой экспериментальных данных Макаровым Э.Л. получены критические сочетания факторов, которые характеризуют потенциальную способность сталей к образованию ХТ, рис. 1.

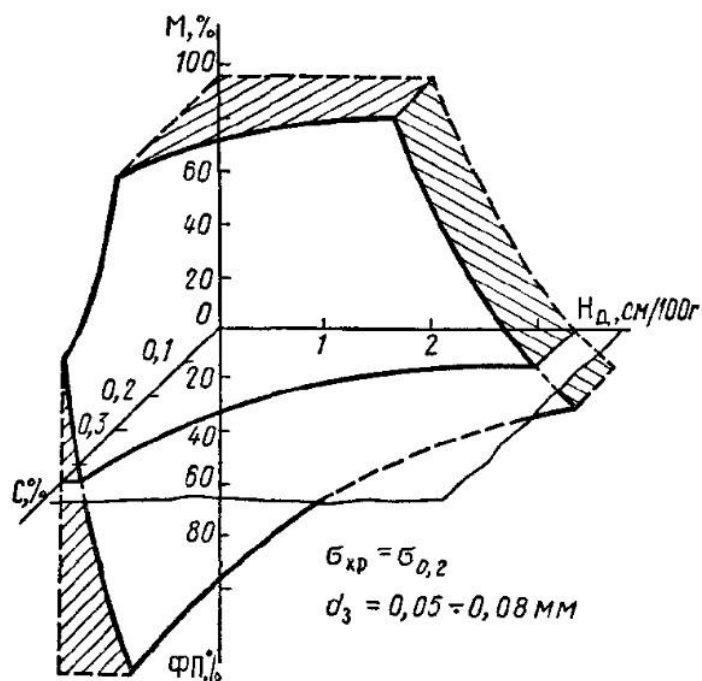


Рис. 1. Критические сочетания факторов появления ХТ в сталях:
 С – углерод; М – мартенсит; ФП – ферритоперлит; Н_д – содержание
 диффузионного водорода; d₃ – размер зерна

Основными параметрами критического структурно-водородного состояния являются: критическое количество мартенсита М_{кр}, %; содержание углерода в стали С, %; концентрация диффузионного водорода Н_д, см³/100 г.

Связь между этими параметрами описывается выражением:

$$M_{кр} = 460C^2 + 455CH_d + 216H_d^2 - 526C - 456H_d + 169.$$

Исследования показывают, что образование холодных трещин происходит при определенном содержании углерода, мартенсита и диффузионного водорода. В частности, склонностью к замедленному разрушению при отсутствии водорода обладают стали с содержанием углерода свыше 0,3 %.

В сталях с содержанием менее 0,2 % углерода склонность к замедленному разрушению проявляется при определенном критическом сочетании мартенсита и диффузионного водорода. При высоком

содержании водорода, склонной к замедленному разрушению становится структура бейнита при отсутствии мартенсита.

Для оценки склонности сталей к образованию холодных трещин в практике используют показатель эквивалента углерода, рекомендуемый Международным институтом сварки (МИС), а также BS EN 1011-2:2001 – Welding. Recommendations for welding of metallic materials. Arc welding of ferritic steels. Standard by British-Adopted European Standard, 03/15/2001:

$$C_{\text{э}} = C + Mn/6 + Cr/5 + Mo/5 + V/5 + (Ni + Cu)/15.$$

Считается, что при $C_{\text{э}} > 0,4$ сталь склонна к образованию холодных трещин. По расчетным данным, теплоустойчивые стали склонны к образованию холодных трещин.

Имеется несколько гипотез, которые поясняют механизм образования ХТ. По схеме Зинера-Стро, при наличии растягивающих напряжений, происходит упруговязкое скольжение зерен вдоль границ, рис. 2.

При этом, касательные напряжения τ релаксируются, а нормальные напряжения σ по поперечным границам усиливаются.

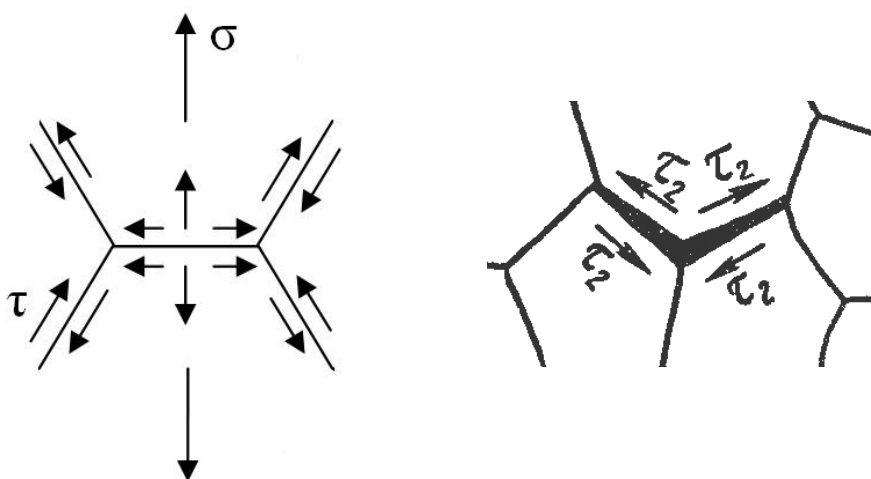


Рис. 2. Схемы Зинера-Стро к замедленному разрушению стали

При наличии мартенсита, вероятность упругопластической деформации на границах зерен снижается, что затрудняет релаксацию напряжений за счет пластической деформации. Вероятность

возникновения ХТ увеличивается при наличии концентраторов напряжений и в вершинах сопряженных границ зерен.

Термический цикл сварки значительно влияет на возникновение холодных трещин. Увеличение скорости охлаждения и снижение погонной энергии сварки приводит к появлению мартенсита при сварке закаливающихся сталей.

Однако, одновременно, это вызывает уменьшение размера зерна. Это приводит к уменьшению ширины и увеличению прочности межзеренных границ, что препятствует возникновению ХТ. В частности, при сварке сталей с содержанием углерода менее 0,25 %, увеличение скорости сварки с $1,4 \cdot 10^{-3}$ до $14 \cdot 10^{-3}$ м/с приводит к росту сопротивления образованию ХТ. Большое значение имеет концентрация диффузионного водорода и состояние микроструктуры. Водород существенно снижает сопротивление ХТ при наличии в шве или околошовной зоне смешанной перлитно-мартенситной, бейнитно-мартенситной или структуры нижнего бейнита.

После окончания сварки концентрация водорода в зоне термического влияния постепенно снижается. На рис. 3 (кривая 1) показана типичная зависимость изменения концентрации водорода при вылеживании для одинакового химического состава шва и основного металла. При низкоуглеродистом основном металле и аустенитном сварном шве концентрация водорода изменяется по кривой 2. В связи с высокой растворимостью в аустените, водород при комнатной температуре не переходит в околошовную зону.

При сварке закаливающихся сталей аустенитными сварочными материалами (кривая 3) закалочные структуры препятствуют проникновению водорода из шва в основной металл. Так как коэффициент диффузии водорода в мартенсите меньше, чем в феррито-перлите, то снижение концентрации водорода в ЗТВ происходит медленнее, чем в незакаленном металле (кривая 2). Если шов имеет феррито-перлитную микроструктуру, а в ЗТВ имеются закалочные структуры, то в ЗТВ сначала происходит увеличение водорода, а затем его постепенное снижение (кривая 4).

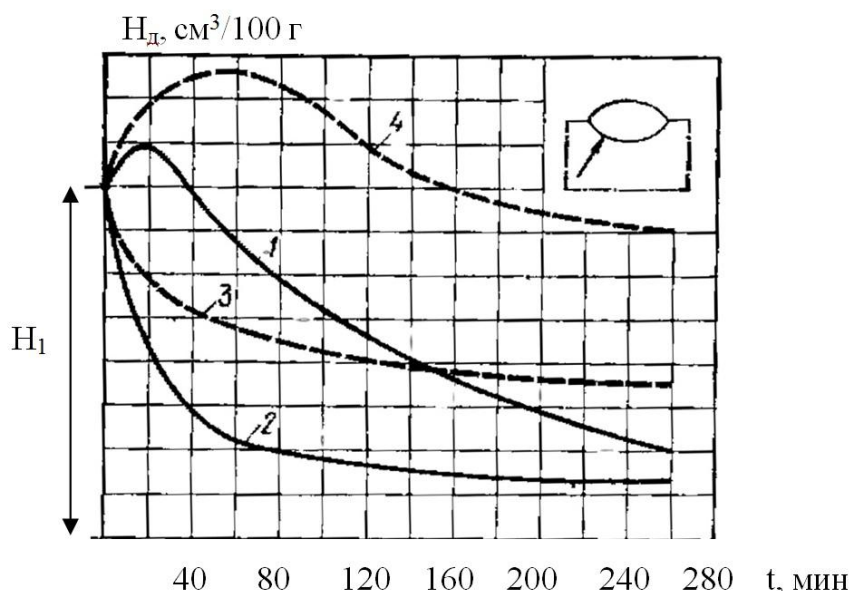


Рис. 3. Изменение концентрации диффузионного водорода H_d на границе шва от времени охлаждения t при начальной концентрации водорода H_1

Для получения оптимальной структуры с высоким сопротивлением ХТ можно применить регулирование теплового цикла сварки: увеличение погонной энергии и предварительный подогрев.

При высоком значении эквивалента углерода $C_э$, для предупреждения ХТ можно применить подогрев свариваемых деталей. Температуру подогрева T можно ориентировочно рассчитать по формуле Д. Сефериана, который экспериментально обосновал необходимость и температуру подогрева снижением температуры мартенситного превращения углеродистых и низколегированных сталей при повышенном содержании углерода и легирующих элементов:

$$T_M = 550 - 360C_э,$$

где: T_M – температура мартенситного превращения, °С; $C_э$ – эквивалентный углерод в стали, %:

$$C_э = C + \frac{1}{9}(Mn + Cr) + \frac{1}{18}Ni + \frac{1}{13}Mo.$$

Температура предварительного подогрева свариваемых деталей определяется по формуле:

$$T = 350\sqrt{C_{Э1} - 0,25},$$

где $C_{Э1} = C_{Э} (1+0,005 \delta)$ – величина, учитывающая влияние толщины металла δ , мм.

Стойкость низколегированных сталей с содержанием углерода 0,07. ..0,22 % и пределом текучести 500...700 МПа можно также оценить по критерию трещиностойкости P_c , согласно параметрического уравнения Ито-Бессю:

$$P_c = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cu}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{20} + 5B + \frac{\delta^2}{600} + \frac{H}{60},$$

где: δ толщина металла, мм; H – концентрация водорода в шве, $\text{см}^3/100 \text{ г}$.

При этом температура подогрева T , °С при температуре воздуха 13...25 °С рассчитывается по формуле:

$$T = 1440P_c - 392.$$

Подогрев позволяет замедлить скорости охлаждения W_{823} и W_{573} при температурах 823 К и 573 К, что уменьшает возникновение закалочных структур мартенсита.

При этом температура подогрева должна быть не слишком высокой, чтобы не увеличивать длительность пребывания металла при $T > 1173 \text{ К}$, в целях предупреждения роста зерна. В частности при сварке низколегированных теплоустойчивых сталей рекомендуется низкий подогрев до 373...523 К, который уменьшает скорость охлаждения W_{823} и предупреждает появление мартенсита.

В целях повышения сопротивления образованию ХТ рекомендуется регулирование микроструктуры: уменьшение размера аустенитного зерна, снижение микрохимической неоднородности на границах зерна, предотвращение выделений дисперсных карбидных, карбонитридных, интерметаллидных фаз, уменьшение количества и увеличение дисперсности мартенсита и нижнего бейнита.

В качестве мер по снижению уровня диффузионного водорода, рекомендуется применять аргонодуговую сварку или сварку под слоем флюса. Эффективным считается связывание водорода в атмосфере дуги в нерастворимые в жидком металле соединения *HF*.

Для повышения стойкости сварных соединений против образования холодных трещин необходимо замедлять охлаждение сварного соединения ниже точки A_{c1} с целью смещения превращения переохлажденного аустенита в область высоких температур, а также предупреждать развитие перегрева в околошовной зоне и возникновение грубой столбчатой структуры в металле шва. Наиболее эффективно можно замедлить охлаждение ниже точки A_{c1} , применяя предварительный и сопутствующий подогрев свариваемых деталей, а также путем выбора оптимальных режимов сварки.

1.3. Механизм возникновения горячих трещин

Горячие трещины (ГТ) образуются в результате первичной кристаллизации, поэтому их часто называют кристаллизационными. При возникновении кристаллитов, пространство между ними заполняется ликвирующими примесями, которые имеют низкую прочность и высокую хрупкость.

При охлаждении металла его объем уменьшается, и в металле возникают растягивающие напряжения, которые приводят к смещению кристаллитов относительно друг-друга. Пока прослойки между кристаллитов находятся в жидком или полужидком состоянии, кристаллиты легко смещаются. Но если прослойки затвердевают, а прочность их меньше прочности кристаллитов, то в прослойках возникают напряжения и образуются трещины.

Трещины всегда располагаются по границам зерен и имеют извилистую траекторию. Так как горячие трещины образуются при высокой температуре, то металл по границам трещин окисляется на воздухе и, поэтому ГТ, которые выходят на поверхность имеют темный цвет. По расположению к оси шва различают продольные и поперечные ГТ, которые располагаются вдоль стыка кристаллитов. ГТ могут

возникать в шве и околошовной зоне, имеют различную протяженность и направление.

Возникновение ГТ связано с процессами кристаллизации металла и существованием твердожидкого состояния сварочной ванны в так называемом эффективном интервале кристаллизации, ограниченном температурой солидуса. Механизм возникновения ГТ можно рассмотреть на схеме перемещения 4-х кристаллов, рис. 4.

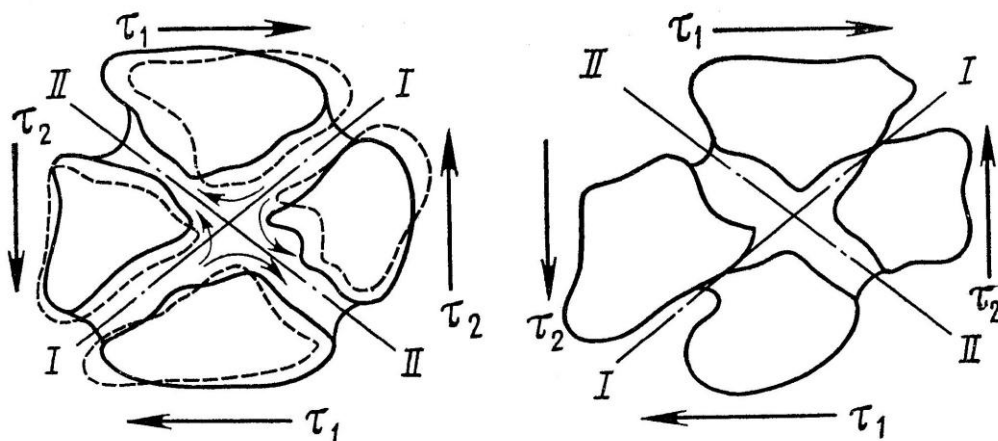


Рис. 4. Схема перемещения кристаллитов в твердожидком металле. Данные Фролова В.В.

Под воздействием пары сил τ_1 , τ_2 кристаллы перемещаются из исходного положения в конечное положение, которое показано пунктирной линией. Такое перемещение кристаллов сопровождается движением жидкой фазы по каналам вдоль плоскостей I-I, II-II.

В результате дальнейшего поворота кристаллы могут сблизиться до соприкосновения по плоскости I-I и для их перемещения необходима пластическая деформация в зоне контакта. Однако для этого, нужно, чтобы жидкая фаза по плоскости II-II обладала прочностью, чтобы выдержать растягивающие напряжения.

При большом объеме жидкой фазы кристаллы имеют свободное перемещение и пластичность металла определяется свойствами жидкости. С уменьшением температуры и объема жидкой фазы, циркуляция

жидкости в каналах прекращается, а прочность межкристаллитных границ снижается.

Снижение прочности и пластичности межкристаллитных границ происходит в определенном интервале температур, который называют температурным интервалом хрупкости (ТИХ). Дальнейшее понижение температуры способствует увеличению прочности межкристаллитных границ.

По природе возникновения различают:

- кристаллизационные горячие трещины;
- полигонизационные горячие трещины.

Первый вид ГТ возникает при первичной кристаллизации, когда сварочная ванна находится в полужидком состоянии. Эти трещины располагаются по границам первичных кристаллов аустенита, а также в зонах ликваций.

Полигонизационные трещины, по-другому, называют подсолдусными, они возникают сразу после кристаллизации сварочной ванны и располагаются на полигонизационных границах, в местах скопления дефектов кристаллической решетки, обладающих малой пластичностью.

Сопротивление образованию кристаллизационным и полигонизационным горячим трещинам определяется тремя факторами:

- величиной ТИХ;
- пластичностью металла в ТИХ (деформационной способностью металла);
- скоростью роста деформаций при охлаждении.

Согласно Прохорову Н.Н. при пересечении кривой деформации e с кривой пластичности δ образуется трещина. Кривая деформации e под номером 2 на рис. 5, *a* соответствует критическому случаю, при котором появляется ГТ.

При увеличении пластичности технологическая прочность сплава увеличивается, вероятность появления ГТ уменьшается, рис. 5, *б*. Расширение области ТИХ увеличивает вероятность появления ГТ, рис. 5, *в*.

Вероятность образования ГТ увеличивается с ростом растягивающих напряжений и с уменьшением деформационной способности твердожидкой фазы в момент кристаллизации. Этому процессу способствует малая вязкость и подвижность жидкой фазы, рост зерна, малая прочность и протяженность межзеренных границ, наличие ликваций и микрохимической неоднородности.

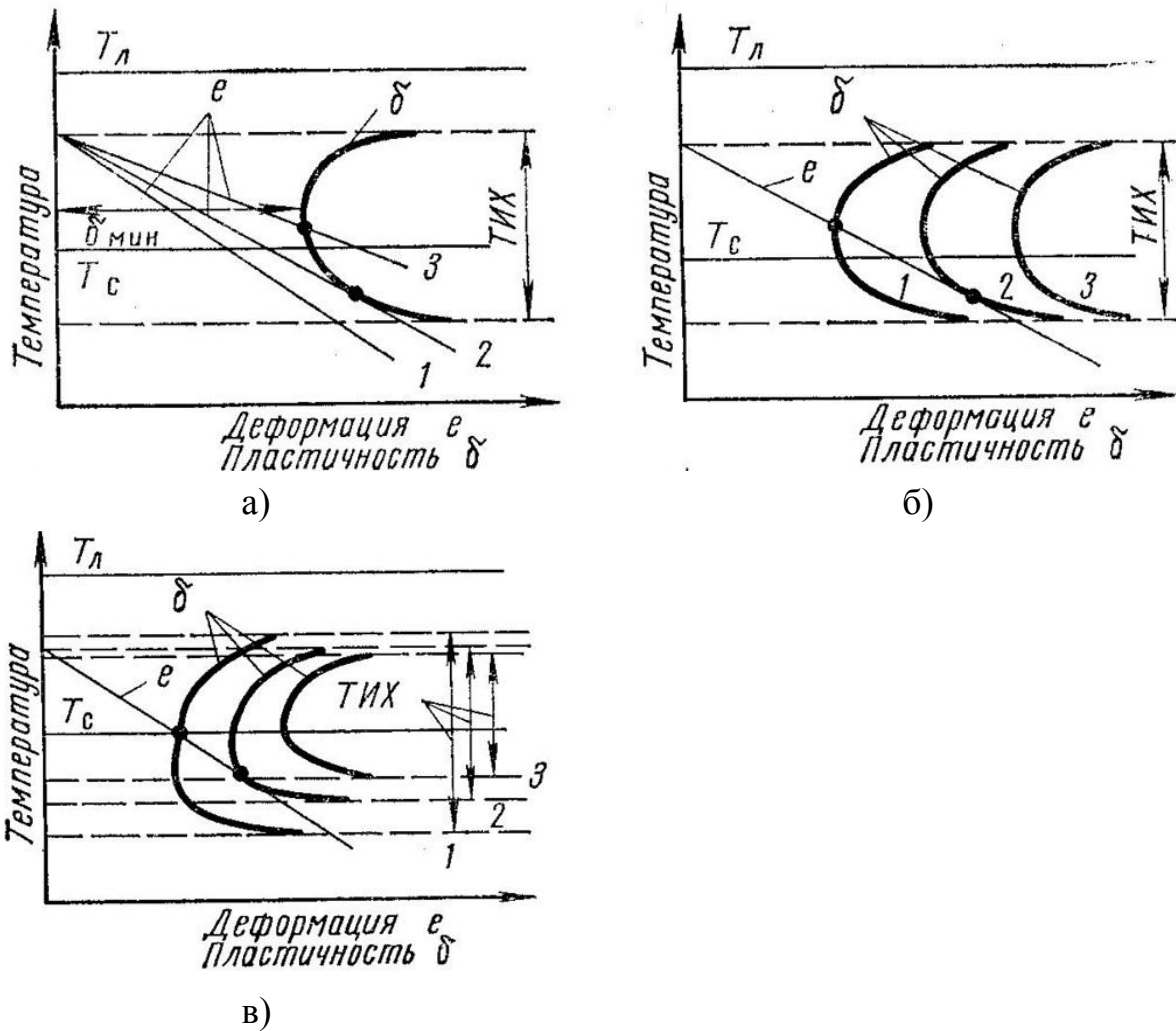


Рис. 5. Изменение межкристаллитной прочности металлов при кристаллизации:
 а – при увеличении роста деформации; б – при увеличении пластичности сплава; в – при уменьшении ТИХ

Повышенное содержание легирующих элементов, примесей увеличивают склонность сталей к появлению ГТ. Сопротивление ГТ увеличивается при снижении содержания элементов *S*, *P*, *Si*, *C*, которые способствуют образованию эвтектик.

Ряд исследований показывает, что влияние легирующих элементов и примесей на склонность сталей к образованию ГТ зависит от микроструктурного состояния: в аустенитно-ферритном шве при содержании феррита 1...5 % элементы *S*, *C*, *P*, *O*, *As*, *Sn*, *Pb*, *B*, *Cu* увеличивает склонность к ГТ, элементы *Mn*, *Mo*, *W* уменьшают, а элементы *Si* (до 3...4 %), *Nb* (до 1,2 %), *Ti* (до 1 %), *V* (до 1,5 %) не влияют на склонность к ГТ.

Для аустенитного шва углерод при малых концентрациях в присутствии *Nb*, *Ti*, *Si* уменьшает склонность к ГТ, аналогично влияние *Mn*, особенно *Mo*, *W*. Элементы *S*, *P*, *Si*, *Nb*, *Ti*, *V*, *As*, *Sn*, *Pb*, *B*, *H* способны увеличивать склонность к ГТ.

Наиболее склонными к возникновению кристаллизационных трещин являются аустенитные и аустенитно-ферритные стали, чему может способствовать повышенное содержание серы и фосфора, рис. 6.

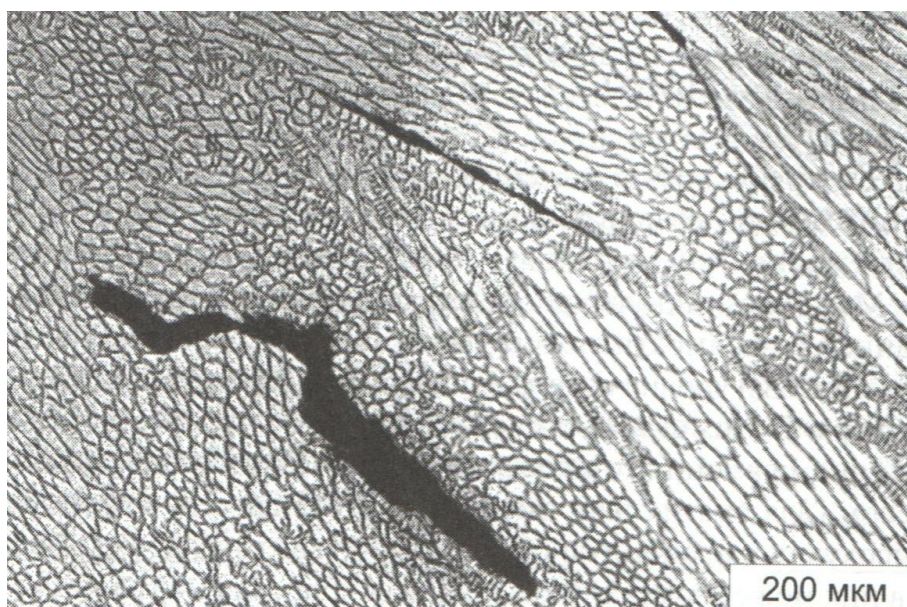


Рис. 6. Кристаллизационные горячие трещины в аустенитном сварном шве.
Данные Липпольда Д.С. и Котеки Д.Д.

По мнению Липпольда Д.С. и Котеки Д.Д. основной мерой по предупреждению кристаллизационных ГТ является регулирование химического состава основного и присадочного металла с обеспечением образования первичного феррита.

Это возможно при кристаллизации с получением двухфазной ферритно-аустенитной структуры с содержанием феррита 3...20 %. Если при кристаллизации образуется аустенитная или аустенитно-ферритная структура, то вероятность кристаллизационных трещин увеличивается. В этих случаях необходимо снижать содержание примесей серы S и фосфора P.

Горячие трещины в зоне ликваций могут возникать в ЗТВ и в металле шва, рис. 7.

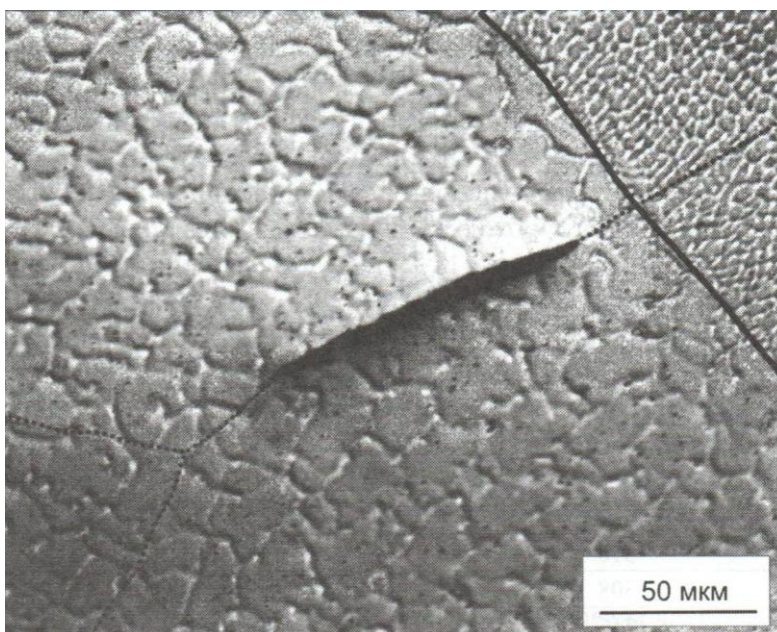


Рис. 7. Горячая трещина в аустенитном многопроходном шве вдоль мигрирующей границы зерен. Сплошная линия – линия сплавления.
Данные Lippold J.C.

Вероятность трещин в зоне ликваций можно уменьшить за счет образования феррита по границам зерен. Феррит ограничивает рост зерен и препятствует смачиванию ликвационной фазой границы феррит-аустенит. При отсутствии феррита и полностью аустенитной структуре металла, необходимо снижать количество примесей, размер зерна и уменьшать тепловложение при сварке.

Технологические мероприятия по снижению вероятности ГТ предусматривают регулирование термомодеформационного цикла сварки, ограничение тепловложения, снижение уровня растягивающих напряжений, уменьшение роста зерна, регулирование химического состава шва.

Соппротивление ГТ можно достичь за счет рациональной конструкции сварного соединения, применения сборочно-сварочных приспособлений для исключения деформаций деталей, за счет увеличения глубины проплавления металла и уменьшения ширины сварного шва.

Для предупреждения ГТ применяют меры по измельчению микроструктуры, снижают величину погонной энергии сварки; увеличивают скорость сварки, уменьшают сварочный ток, разрабатывают рациональные схемы наложения валиков малого сечения, охлаждают и проковывают сварочные валики.

Эффективным способом предупреждения ГТ является регулирование химического состава шва за счет правильного выбора сварочных материалов, уменьшения содержания примесей, получения в шве двухфазной микроструктуры.

2. Технология сварки высоколегированных сталей

2.1. Классификация и свойства сталей мартенситного, мартенситно-ферритного и ферритного класса

В промышленности широко применяются стали мартенситного (ГОСТ 5632–72, ТУ 14-3450–75, ТУ 108-976–80, ТУ 108-923–80), мартенситно-ферритного (ГОСТ 5632–72, ГОСТ 10835–75, ТУ 14-159-155–82) и ферритного класса (ГОСТ 5632–72, ТУ 14-1-2194–77, ТУ 14-1-2533–78). Также известны супермартенситные стали с пониженным содержанием углерода до 0,02 %, стали специального назначения, супераустенитные, дуплексные и дисперсионно-твердеющие хромоникелевые стали, выпускаемые по стандарту американского общества по испытанию и материалам (American Society for Testing and Materials), табл. 1, 2, 3.

Нержавеющие стали имеют высокую стойкость против коррозии, что объясняется наличием на поверхности сталей устойчивого прочного оксида хрома Cr_2O_3 . Стали этих классов применяются для изготовления энергетического, химического и пищевого оборудования, деталей турбин, клапанов, труб.

История создания высоколегированных нержавеющих сталей начинается с 1821 года, когда были осуществлены первые опыты по легированию хромом стали французом Berthier. В 1887 году немецкий ученый Goldschmidt разработал технологию производства низкоуглеродистых хромистых сталей, в 1907-1909 году началось производство 13 % и 17 % хромистой стали в Германии и Франции, в 1913 году англичанин Brearly получил хромистую сталь на фирме Thomas Firth and Sons.

К сталям мартенситного класса относят средне- и высоколегированные стали с системой легирования Fe-Cr-C с содержанием хрома ~ 12–14 % и повышенным содержанием углерода: более 0,05 %. При нагреве этих сталей образуется аустенитная структура, которая при охлаждении переходит полностью в мартенсит, независимо от скорости охлаждения. Мартенситные стали имеют среди нержавеющих

сталей самый низкий уровень коррозионной стойкости и эксплуатируются при температуре до 650 °С.

К сталям мартенситно-ферритного класса относят стали с содержанием хрома ~ 13–16 %. При содержании хрома более ~ 16 % стали относят к ферритному структурному классу. При высоком содержании хрома аустенитная структура сталей при нагреве не переходит полностью в аустенит и имеет некоторое количество феррита. При охлаждении из аустенитно-ферритной структуры образуется мартенситно-ферритная. С увеличением хрома и элементов-ферритизаторов, количество ферритной фазы увеличивается.

Таблица 1

Химический состав некоторых сталей мартенситного, мартенситно-ферритного и ферритного класса

Марка стали	Содержание химических элементов, %					
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Прочие
Стали мартенситного класса						
15X11МФ	0,12–0,19	<0,5	<0,7	10–11,5	–	S<0,025; P<0,03; Y 0,25–0,4; Mo 0,6–0,8
18X11МНФБ	0,15–0,21	<0,6	0,6–1	10–11,5	0,5–1	S<0,025; P<0,03; Nb 0,2–0,45; Y 0,2–0,4; Mo 0,8–1,1
13X11Н2В2МФ	0,1–0,16	<0,6	<0,6	10,5–12	1,5–1,8	S<0,025; P<0,03; W 1,6–2; Y 0,18–0,3; Mo 0,35–0,5
12X11В2МФ	0,1–0,15	<0,5	0,5–0,8	10–12	0,6	S<0,025; P<0,025; W 1,7–2,2; Y 0,15–0,3; Mo 0,6–0,9
20X13	0,16–0,25	<0,8	<0,8	12–14	–	S<0,025; P<0,03
10X12НД	<0,1	<0,3	<0,6	12–13,5	2,8–3,2	S<0,025; P<0,025; Cu 0,8–1; Mo 0,8–1,1
06X12НЗД	<0,06	<0,3	<0,6	12–13,5	2,8–3,2	S<0,025; P<0,025; Cu 0,8–1,1
Стали мартенситно-ферритного класса						
15X12ВНМФ	0,12–0,18	<0,4	0,5–0,9	11–13	0,4–0,8	S<0,025; P<0,03; W 0,7–1,1; Y 0,15–0,3; Mo 0,5–0,7

Марка стали	Содержание химических элементов, %					
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Прочие
08X13	<0,08	<0,8	<0,8	12–14	–	S<0,025; P<0,03
12X13	0,09–0,15	<0,8	<0,8	12–14	–	S<0,025; P<0,03
08X14МФ	0,03–0,12	0,2–0,45	0,8–1,2	12–14,8	–	S<0,022; P<0,035
14X17H2	0,11–0,17	<0,8	<0,8	16–18	–	S<0,025; P<0,03
Стали ферритного класса						
08X17T	<0,08	<0,8	<0,8	16–18	–	S<0,025; P<0,035; Ti 0,5–0,8
15X25T	<0,15	<1	<0,8	24–27	–	S<0,025; P<0,035; Ti 0,5–0,9
08X23C2Ю	<0,08	<1,8	0,4–0,7	22–24	–	S<0,015; P<0,03; Al 1,1–1,6
Супермартенситные стали*						
Низколегированные стали	0,01	0,2	1,5	11	1,5	Cu-0,5; N<0,01
Среднелегированные стали	0,01	0,2	0,5	13	4,5	Mo-1; Cu-0,5; N<0,05
Высоколегированные стали	0,01	0,2	0,5	12	6,0	Mo-2,5; Cu-0,2; N<0,01

*данные из обзора Marshall A.W., Farrar J.C. 2001. Welding of ferritic and martensitic 11-14 % Cr steels, Welding in the World, 45(5/6): 32-55

Таблица 2

Химический состав некоторых мартенситных сталей по стандарту ASTM
(Американское общество по испытанию и материалам)

Марка стали	Содержание химических элементов, max, %					
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Прочие
403	0,15	0,5	1,0	11,5-13	-	-
410	0,15	1,0	1,0	11,5-13,5	-	-
410NiMo	0,05	0,6	0,5-1	11,4-14	3,5-5,5	Mo: 0,5-1
414	0,15	1,0	1,0	11,5-13,5	1,25-2,5	-
416	0,15	1,0	1,25	12-14	-	S: менее 0,5; Mo: 0,6
420	> 0,15	1,0	1,0	12-14	-	-

Марка стали	Содержание химических элементов, max, %					
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Прочие
422	0,2-0,25	0,75	1,0	11,5-13,5	0,5-1	Mo: 0,75-1,25; W: 0,75-1,25; V: 0,15-0,3
431	0,2	1,0	1,0	15-17	1,25-2,5	-
440A	0,6-0,75	1,0	1,0	16-18	-	Mo: 0,75
440B	0,75-0,95	1,0	1,0	16-18	-	Mo: 0,75
440C	0,95-1,2	1,0	1,0	16-18	-	Mo: 0,75
CA-15	0,15	1,5	1	11,5-14	1	Mo: 0,5
CA-6NM	0,06	1	1	11,5-14	3,5-4,5	Mo: 0,4-1

Таблица 3

Химический состав деформируемых аустенитных сталей по стандарту ASTM (Американское общество по испытанию и материалам)

Марка стали	Содержание химических элементов, max, %					
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Прочие
201	0,15	1	5,5-7,5	16-18	3,3-5,5	P: 0,06; S: 0,03; N: 0,25
302	0,15	1	2	17-19	8-10	S: 0,03;P: 0,045
304	0,08	1	2	18-20	8-10,5	S: 0,03;P: 0,045
304L	0,03	1	2	18-20	8-12	S: 0,03;P: 0,045
304H	0,04-0,1	1	2	18-20	8-10,5	S: 0,03;P: 0,045
308	0,08	1	2	19-21	10-12	S: 0,03;P: 0,045
309	0,2	1	2	22-24	12-15	S: 0,03;P: 0,045
310	0,25	1	2	24-26	19-22	S: 0,03;P: 0,045
316	0,08	1	2	16-18	10-14	S: 0,03;P: 0,045; Mo: 2-3
316L	0,03	1	2	16-18	10-14	S: 0,03;P: 0,045; Mo: 2-3
317	0,08	1	2	18-20	11-15	S: 0,03;P: 0,045; Mo: 3-4
321	0,08	1	2	17-19	9-12	S: 0,03;P: 0,045; Ti: 5×C – 0,7
330	0,1	0,75-1,5	2	17-20	34-37	S: 0,03;P: 0,045
347	0,08	1	2	17-19	9-13	S: 0,03;P: 0,045; Ti: 10×C – 1,0

В качестве сварочных материалов применяют покрытые электроды, присадочные прутки и порошковые проволоки по табл. 4, 5, 6.

Таблица 4

Химический состав покрытых электродов для сварки аустенитных сталей по стандарту AWS A5.4

Марка	Содержание химических элементов, max, %					
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Прочие
219	0,06	1	8-10	19-21,5	5,5-7	S: 0,03; P: 0,04; Mo: 0,75; N: 0,1-0,3
308	0,08	1	0,5-2,5	18-21	9-11	S: 0,03; P: 0,04; Mo: 0,75
308H	0,04-0,08	1	0,5-2,5	18-21	9-11	S: 0,03; P: 0,04; Mo: 0,75
308L	0,04	1	0,5-2,5	18-21	9-11	S: 0,03; P: 0,04; Mo: 0,75
309	0,15	1	0,5-2,5	22-25	12-14	S: 0,03; P: 0,04; Mo: 0,75
309L	0,04	1	0,5-2,5	22-25	12-14	S: 0,03; P: 0,04; Mo: 0,75
310	0,08-0,2	0,75	1-2,5	25-28	20-22,5	S: 0,03; P: 0,03; Mo: 0,75
316	0,08	1	0,5-2,5	17-20	11-14	S: 0,03; P: 0,04; Mo: 2-3
316H	0,04-0,08	1	0,5-2,5	17-20	11-14	S: 0,03; P: 0,04; Mo: 0,75
316H	0,04	1	0,5-2,5	17-20	11-14	S: 0,03; P: 0,04; Mo: 0,75
317	0,08	1	0,5-2,5	18-21	12-14	S: 0,03; P: 0,04; Mo: 3-4
317L	0,04	1	0,5-2,5	18-21	12-14	S: 0,03; P: 0,04; Mo: 3-4
330	0,18-0,25	0,9	1-2,5	14-17	33-37	S: 0,03; P: 0,04; Mo: 0,75
347	0,08	1	0,5-2,5	18-21	9-11	S: 0,03; P: 0,04; Mo: 0,75; Nb: $8 \times C - 1,0$

Таблица 5

Химический состав проволок и прутков для сварки аустенитных сталей по стандарту AWS A5.9

Марка	Содержание химических элементов, max, %					
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Прочие
219	0,05	1	8-10	19-21,5	5,5-7	S: 0,03; P: 0,03; Mo: 0,75; N: 0,1-0,3
308	0,08	0,3-0,65	1-2,5	19,5-22	9-11	S: 0,03; P: 0,03; Mo: 0,75
308H	0,04-0,08	0,3-0,65	1-2,5	19-21,5	9-11	S: 0,03; P: 0,03; Mo: 0,75
308L	0,03	0,3-0,65	1-2,5	19,5-22	9-11	S: 0,03; P: 0,03; Mo: 0,75
308Si	0,08	0,65-1	1-2,5	19-21,5	9-11	S: 0,03; P: 0,03; Mo: 0,75
308LSi	0,03	0,65-1	1-2,5	19,5-22	9-11	S: 0,03; P: 0,03; Mo: 0,75
309	0,12	0,3-0,65	1-2,5	23-25	12-14	S: 0,03; P: 0,03; Mo: 0,75
309L	0,03	0,3-0,65	1-2,5	23-25	12-14	S: 0,03; P: 0,03; Mo: 0,75
309Si	0,12	0,65-1	1-2,5	23-25	12-14	S: 0,03; P: 0,03; Mo: 0,75
309LSi	0,03	0,65-1	1-2,5	23-25	12-14	S: 0,03; P: 0,03; Mo: 0,75
310	0,08-0,15	0,3-0,65	1-2,5	25-28	20-22,5	S: 0,03; P: 0,03; Mo: 0,75
316	0,08	0,3-0,65	1-2,5	18-20	11-14	S: 0,03; P: 0,03; Mo: 2-3
316H	0,04-0,08	0,3-0,65	1-2,5	18-20	11-14	S: 0,03; P: 0,03; Mo: 2-3
316L	0,03	0,3-0,65	1-2,5	18-20	11-14	S: 0,03; P: 0,03; Mo: 2-3
316Si	0,08	0,65-1	1-2,5	18-20	11-14	S: 0,03; P: 0,03; Mo: 2-3
316LSi	0,03	0,65-1	1-2,5	18-20	11-14	S: 0,03; P: 0,03; Mo: 2-3
317	0,08	0,3-0,65	1-2,5	18,5-20,5	13-15	S: 0,03; P: 0,03; Mo: 3-4
317L	0,03	0,3-0,65	1-2,5	18,5-20,5	13-15	S: 0,03; P: 0,03; Mo: 3-4

Марка	Содержание химических элементов, max, %					
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Прочие
330	0,18-0,25	0,3-0,65	1-2,5	15-17	34-37	S: 0,03; P: 0,03; Mo: 0,75
347	0,08	0,3-0,65	1-2,5	19-21,5	9-11	S: 0,03; P: 0,03; Mo: 0,75; Nb: 10×C - 1,0
347Si	0,08	0,65-1	1-2,5	19-21,5	9-11	S: 0,03; P: 0,03; Mo: 0,75; Nb: 10×C - 1,0

Таблица 6

Химический состав порошковой проволоки для сварки аустенитных сталей по стандарту AWS A5.22

Марка	Содержание химических элементов, max, %					
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Прочие
308	0,08	1	0,5-2,5	18-21	9-11	S: 0,03; P: 0,04; Mo: 0,5
308L	0,04	1	0,5-2,5	18-21	9-11	S: 0,03; P: 0,04; Mo: 0,5
308H	0,04-0,08	1	0,5-2,5	18-21	9-11	S: 0,03; P: 0,04; Mo: 0,5
309	0,1	1	0,5-2,5	22-25	12-14	S: 0,03; P: 0,04; Mo: 0,5
309L	0,04	1	0,5-2,5	22-25	12-14	S: 0,03; P: 0,04; Mo: 0,5
310	0,2	1	1-2,5	25-28	20-22,5	S: 0,03; P: 0,03; Mo: 0,5
316	0,08	1	0,5-2,5	17-20	11-14	S: 0,03; P: 0,04; Mo: 2-3
316L	0,04	1	0,5-2,5	17-20	11-14	S: 0,03; P: 0,04; Mo: 2-3
317L	0,04	1	0,5-2,5	18-21	12-14	S: 0,03; P: 0,04; Mo: 3-4
347	0,08	1	0,5-2,5	18-21	9-11	S: 0,03; P: 0,04; Mo: 0,5; Nb: 8×C - 1,0

2.2. Диаграммы структурного состояния хромоникелевых сталей

Для прогнозирования микроструктуры катанных нержавеющей сталей Штраус и Маурер представили в 1929 году фазовую диаграмму хромоникелевых сталей, которая позволяет прогнозировать появление различных фаз при медленном охлаждении. Диаграмма Штрауса и Маурера, была модифицирована Шерером и Ридрихом (Scherer R., Riedrich G.) в 1939 году, рис. 8.

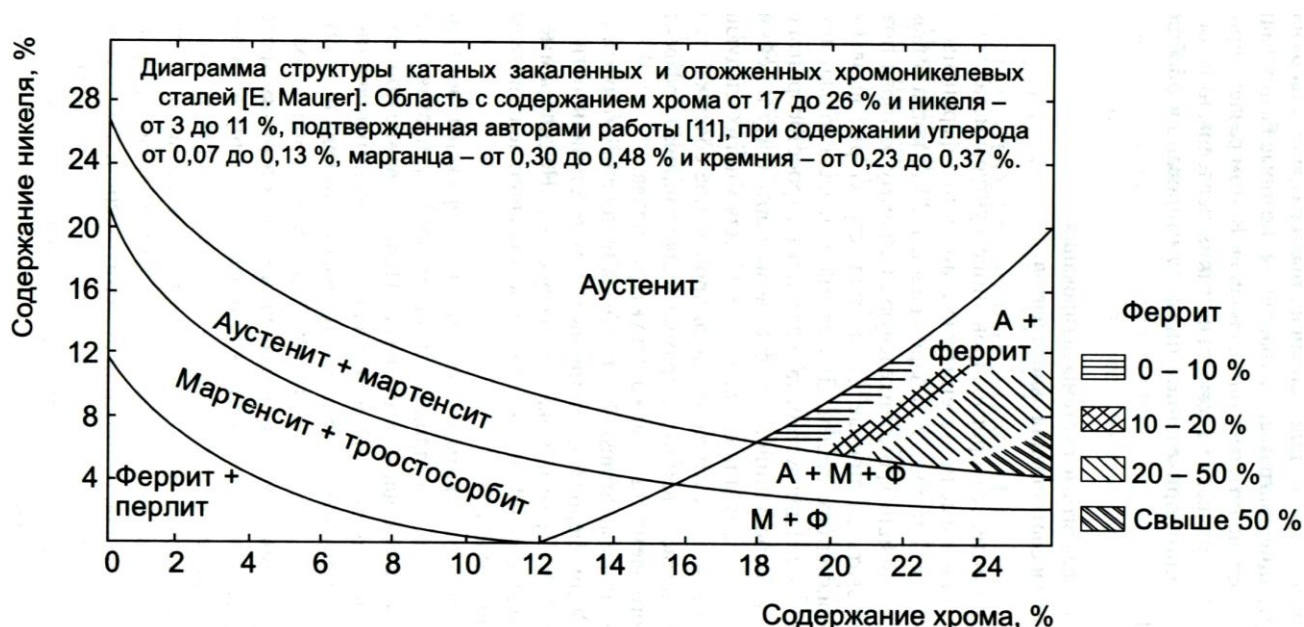


Рис. 8. Диаграмма микроструктурного состояния хромоникелевых сталей [Strauss B., Maurer E. 1920. Die hochlegierten Chromnickelstahle als nichrostende Stahle, Kruppsche monatshefte, 1(8): 129-146.]

Антон Шеффлер применил данные Strauss-Maurer для практического использования при сварке, с целью определения микроструктурного состояния металла сварного шва на основе химического состава. Для этого диаграмма Шеффлера содержит по осям координат эквиваленты хрома (ферритообразующие элементы) и никеля (аустенитообразующие элементы), рис. 9. Вторая диаграмма Шеффлера используется и в настоящее время. Кроме того, имеются различные модификации этой диаграммы, в частности Matthes K.-J., Richter E. приводят диаграмму Шеффлера с другими эквивалентами хрома и никеля, рис. 10.

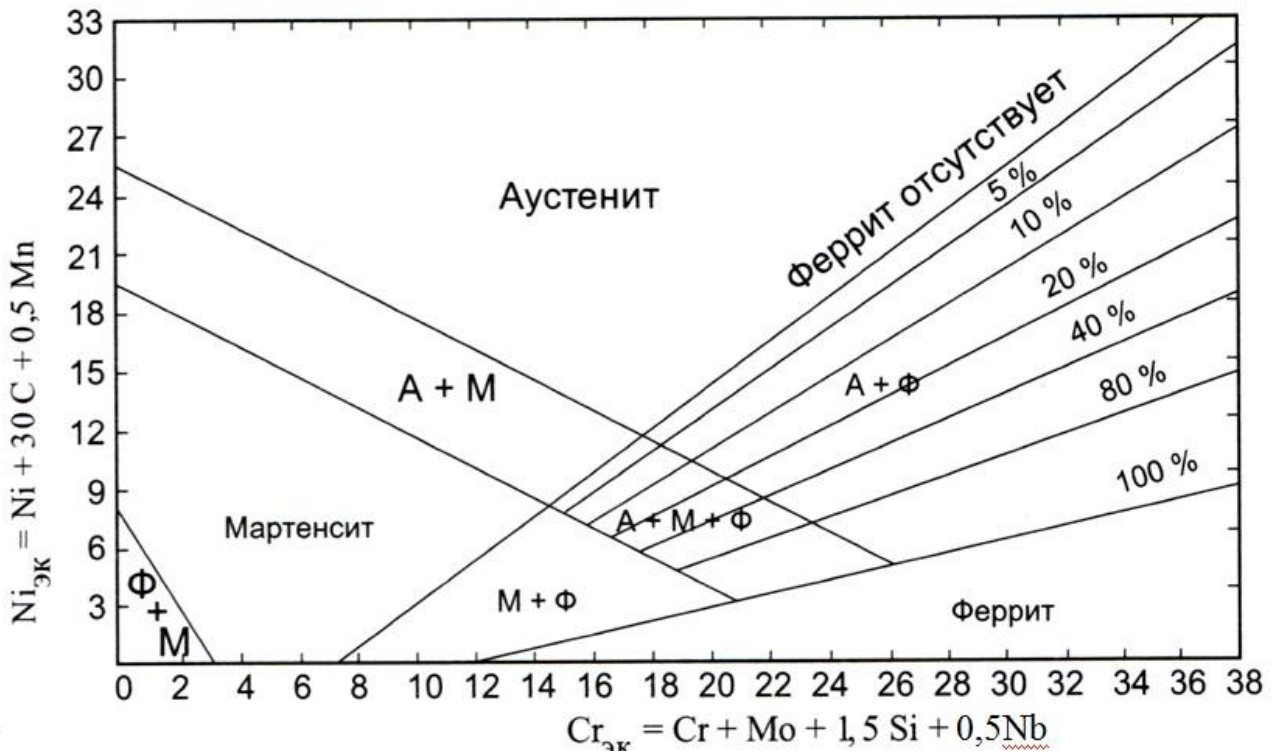
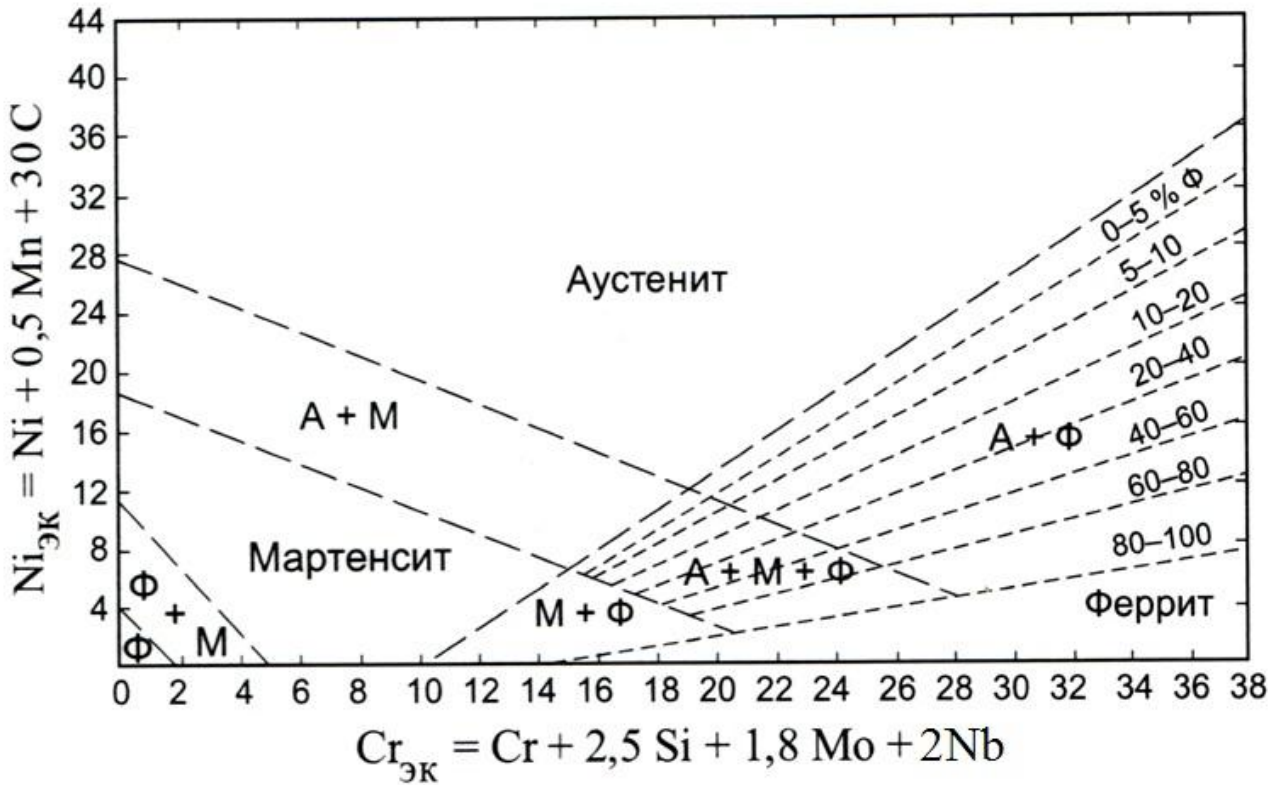


Рис. 9. Диаграммы Шеффлера [Schaeffler A.L. 1948. Welding dissimilar metals with stainless electrodes, Iron Age, 162:72, July] и [Schaeffler A.L. 1948. Constitution diagram for stainless steel weld metal, Metal Progress, 56(11): 680-680B]

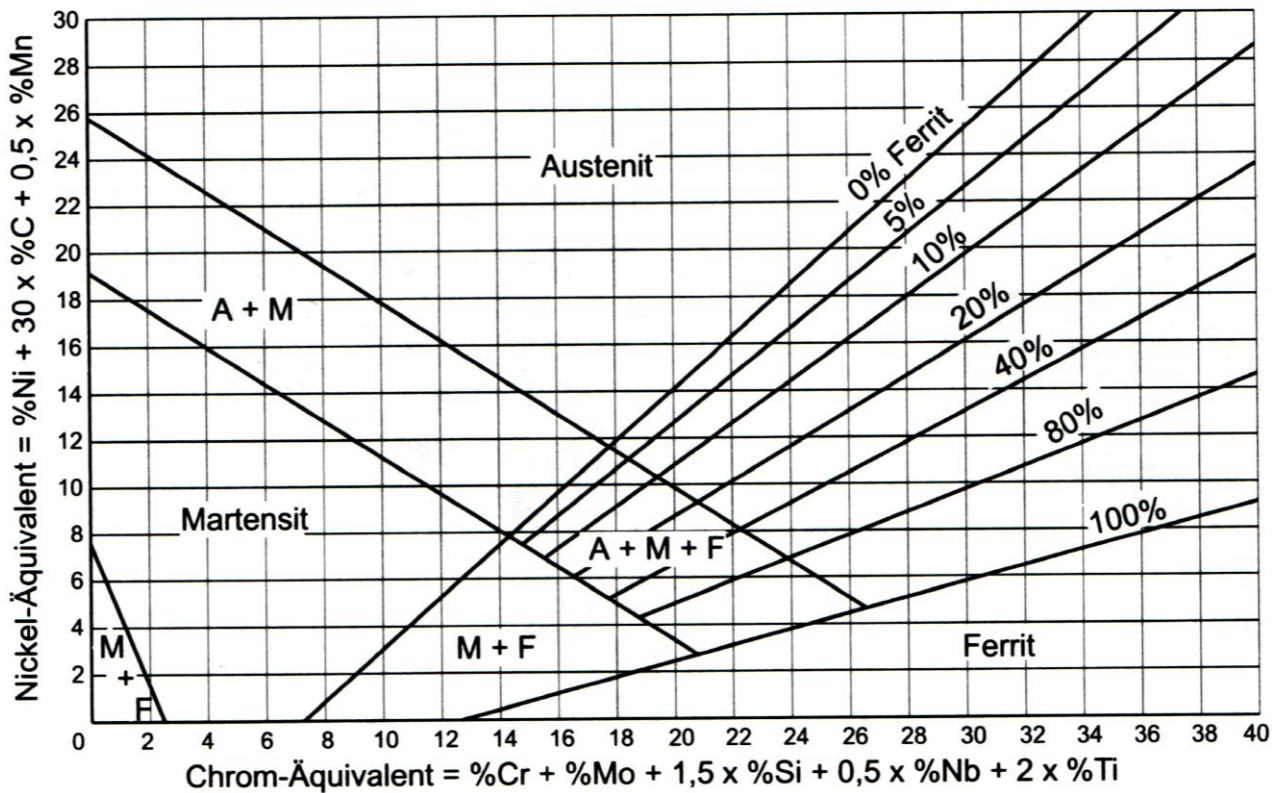


Рис. 10. Диаграмма Шеффлера [Matthes K.-J., Richter E. Schweißtechnik. Schweißen von metallischen Konstruktionswerkstoffen. Auflage 2. – Fachbuchverlag Leipzig, 2003. – 471 с.]

Последующим развитием диаграммы Шеффлера стало введение в 1956 году Делонгом ферритного числа [DeLong W.T., Ostrom G.T.A., Szumachowski E.R. 1956. Measurement and calculation of ferrite in stainless steel weld metal. Welding Journal, 35(11): s. 521-528]. Это позволило прогнозировать содержание ферритной фазы в аустенитных сталях. Кроме того, Делонг показал, что азот влияет на количество феррита и ввел его в **НОВЫЙ НИКЕЛЬ-ЭКВИВАЛЕНТ**:

$$Ni_{\text{ЭКВ}} = Ni + 0,5Mn + 30C + 30 N.$$

В 1973 году Делонгом была представлена диаграмма со шкалой ферритного числа FN, которое сейчас определяется магнитными измерениями ферромагнетика-феррита. Ферритное число FN принято для измерения феррита, а метод измерения определен в стандартах AWS A 4.2, ISO 8249, рис. 11.

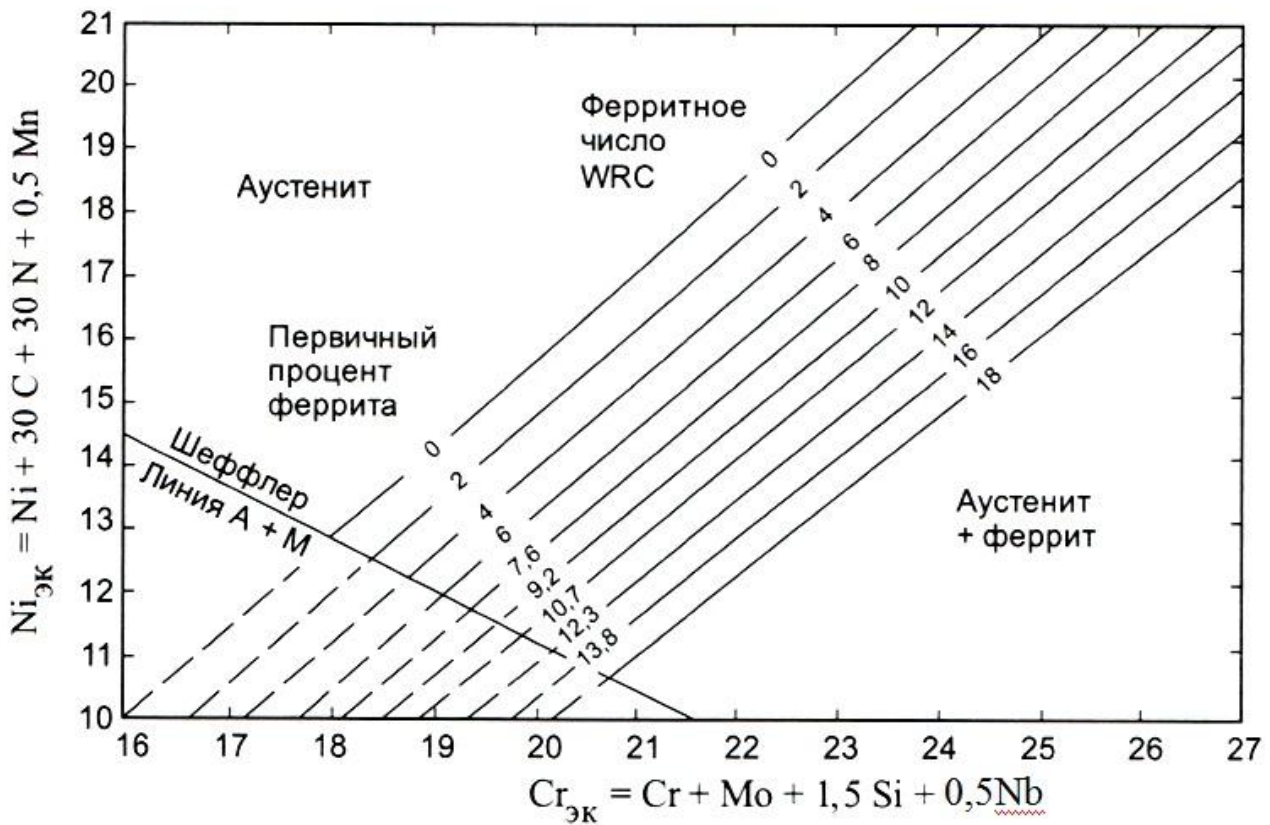


Рис. 11. Диаграмма Делонга 1973 г. с ферритным числом

В 1988 и в 1992 году в США на основе диаграмм Шеффлера и Делонга были разработана более точные диаграммы с учетом данных по экспериментальным исследованиям сварных соединений. Были разработаны новые эквиваленты, рис. 12.

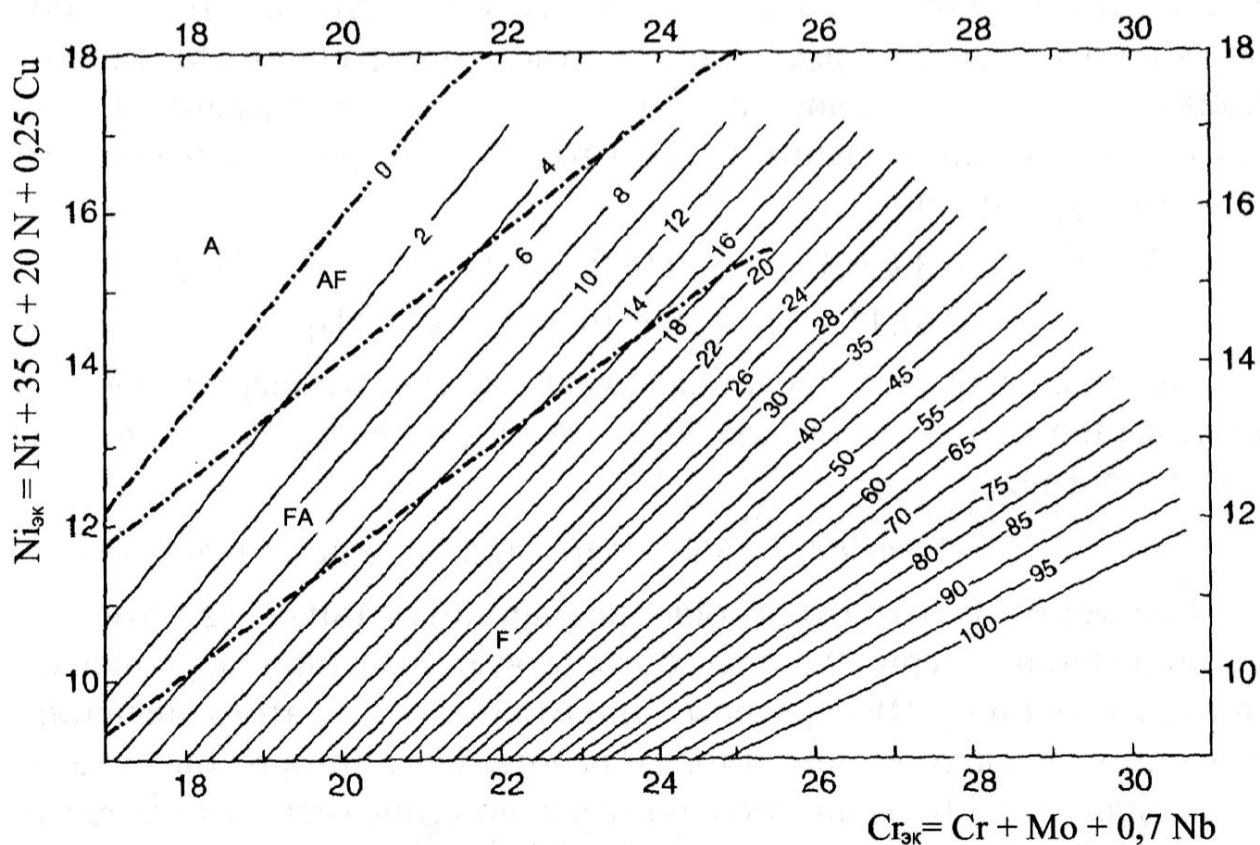


Рис. 12. Диаграмма структурного состояния при сварке сталей аустенитно-ферритной системы легирования WRC-1992 [Липольд Д.С., Котеки Д.Д. *Металлургия сварки и свариваемость нержавеющей сталей: Пер. с англ. Под ред. Н.А. Соснина, А.М. Левченко.* – СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2011. – 467 с.]

Для прогнозирования микроструктуры аустенитно-мартенситных сталей, область которой находится в левой нижней части диаграммы Шеффлера, была разработана отдельная диаграмма, рис. 13.

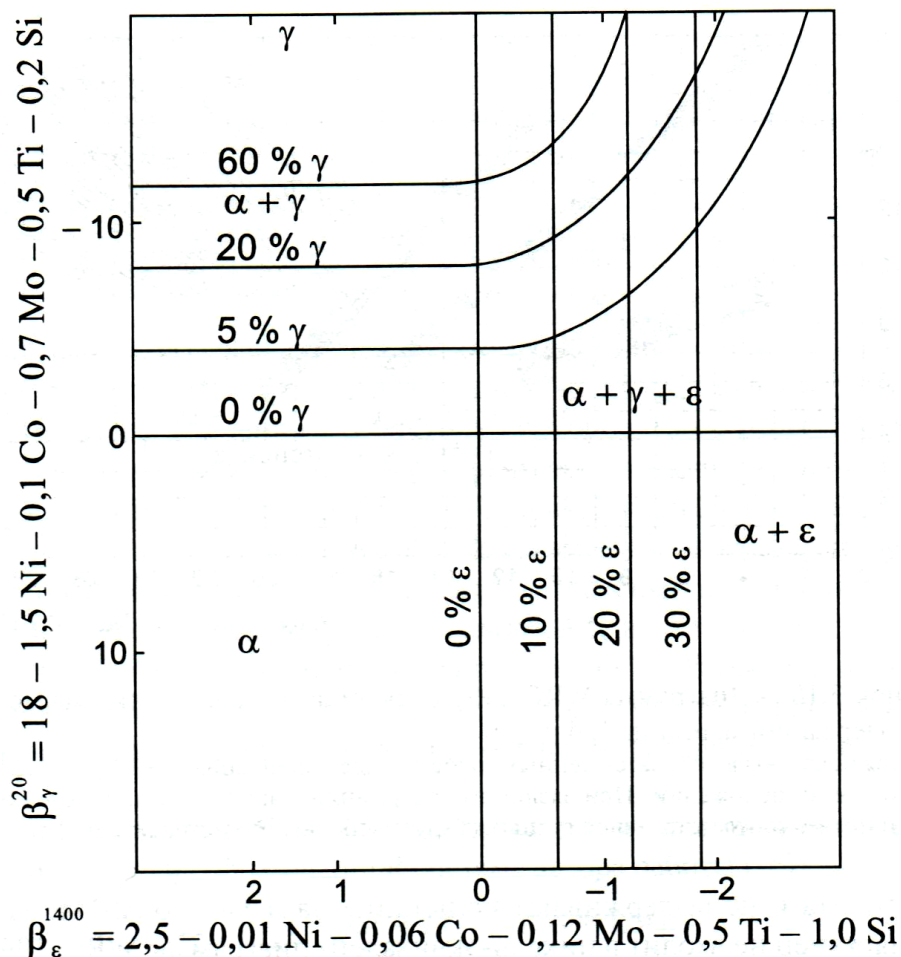


Рис. 13. Диаграмма для прогнозирования количества мартенсита, аустенита и фазы Лавеса в аустенитно-мартенситных системах легирования [Данные Бармина Л.Н., Королева Н.В. и др. 1980 г.]

Котеки (Kotecki D.J.) применяя диаграмму WRC-1992 исследовал формирование мартенсита и определил границы, которые разделяют аустенитные и аустенитно-ферритные стали для содержания марганца 1; 4; 10 %. При заданном содержании марганца выше и правее затемненных областей химического состава, мартенсит отсутствует в микроструктуре, рис. 14.

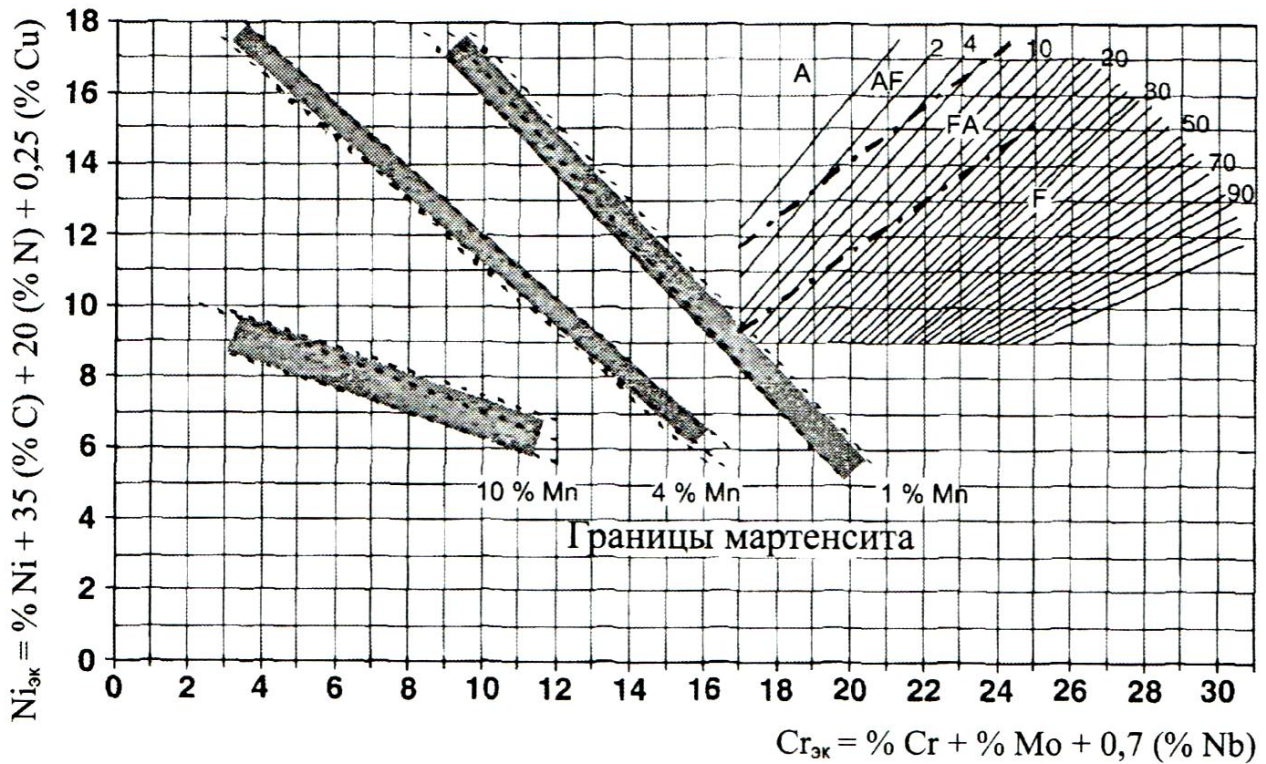


Рис. 14. Модификация диаграммы WRC-1992 с границами мартенсита при содержании марганца 1; 4; 10 %. Выше и ниже затемненных полос при заданном содержании Mn мартенсит отсутствует. Данные Kotecki D. J. 1999. A martensite boundary on the WRC-1992 diagram, 2: the effect of manganese, welding journal, 79(12): s. 346-354

В 1999 году в Британском институте сварки TWI разработали диаграмму для прогнозирования содержания феррита в сталях с низким содержанием углерода и 13 % хрома – в супермартенситных сталях. Затем в 2000 году на основе опытных плавок и данных металлографии была создана диаграмма, которая позволяет анализировать большинство ферритных и мартенситных сталей, рис. 15.

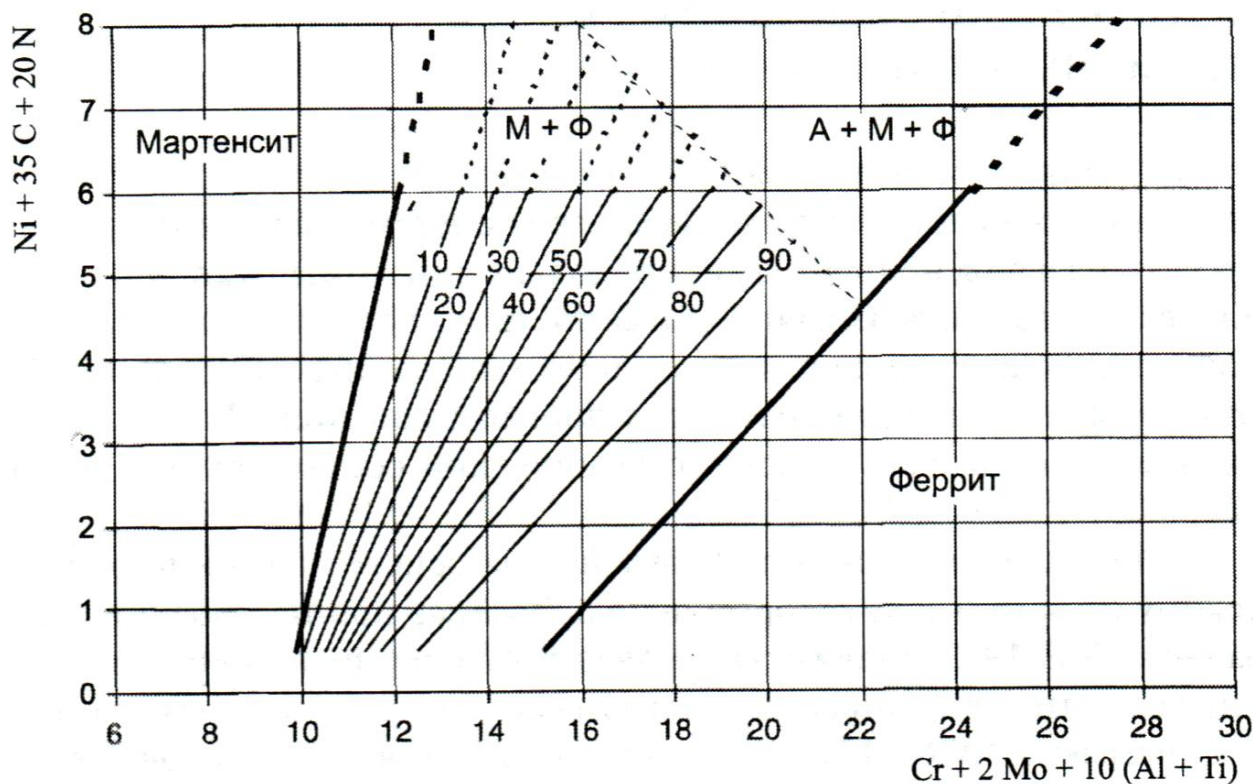


Рис. 15. Диаграмма микроструктуры сварных швов ферритных и мартенситных нержавеющей сталей. Данные [Balmforth M.C., Lippold J.C. 2000. A new ferritic-martensitic stainless steel constitution diagram, Welding Journal, 79(12): s. 339-345]

Данная диаграмма разработана к следующим диапазонам легирующих элементов, табл. 7.

Таблица 7

Диапазоны содержания легирующих элементов к диаграмме Balmforth-Lippold

Cr 11-30 %	Si 0,3-1 %	Mn 0,3-1,8 %
Ni 0,1-3 %	C 0,07-0,2 %	Mo 0-0,2 %
Al 0-0,3	Ti 0-0,5 %	N 0-0,25 %

Данная диаграмма позволяет прогнозировать микроструктуру сварных швов мартенситных и ферритных сталей в определенных диапазонах содержания легирующих элементов.

2.3. Технология сварки сталей мартенситного, мартенситно-ферритного и ферритного класса

Мартенситно-ферритные стали обладают ограниченной свариваемостью. Основной проблемой при сварке сталей этих классов является образование холодных трещин при охлаждении шва и околошовной зоны до температуры менее 100 °С. Применение обычных сварочных материалов с химическим составом, аналогичным составу основного металла почти всегда приводит к возникновению холодных трещин (ХТ). ХТ возникают в результате совместного действия нескольких факторов: образование закалочных структур (мартенсита), наличие высоких сварочных напряжений, насыщение сварочной ванны водородом и образование крупнозернистой структуры.

Основным способом предупреждения холодных трещин является применение предварительного и сопутствующего подогрева до 150–450 °С и послесварочного отдыха при температуре 100–120 °С в течение 10–36 часов. Без подогрева работоспособные швы можно получить при использовании в металле шва аустенитной хромоникелевой структуры, которая обладает высокой пластичностью.

Для сварки мартенситно-ферритных сталей используют ручную дуговую сварку покрытыми электродами, механизированную сварку плавящимся электродом в среде углекислого и инертного газа, сварку вольфрамовым электродом в среде инертного газа и сварку под флюсом.

При сварке покрытыми электродами используют электроды с фтористокальциевым покрытием, которое состоит из плавикового шпата CaF_2 и мрамора CaCO_3 . Данные компоненты эффективно связывают серу и фосфор. Для раскисления в составе покрытий содержатся раскислители. Перед сваркой для удаления адсорбированного водорода электроды прокаливают при температуре 350...400 °С в течение 1–2 часов.

Сварку ведут на обратной полярности: на электроде «плюс» (анод), на катоде-изделии «минус». Обратная полярность применяется для электродов с качественным покрытием основного типа.

Хорошие результаты получаются при сварке вольфрамовым электродом в инертном газе. В этом случае присадочный материал

выбирают аналогично составу основного металла. Способ обеспечивает надежную защиту сварочной ванны от проникновения газов, поэтому металл шва характеризуется более высокой пластичностью. Однако данный способ обладает низкой производительностью и эффективен при сварке небольших деталей сложной формы, например лопаток турбин.

Сварка плавящимся электродом в CO_2 вызывает окисление металла, поэтому применяют сварочную проволоку с высоким содержанием раскислителей или порошковую проволоку.

Для сварки под флюсом не пригодны обычные высококремнистые или марганцовистые флюсы из-за выгорания и окисления легирующих элементов. Безкислородные солевые флюсы также не применяют из-за плохого формирования шва. Поэтому для сварки данных сталей используют основные низкомарганцовистые флюсы типа ОФ или АН-17.

Для уменьшения образования холодных трещин применяют предварительный и сопутствующий подогрев до 100–450 °С. Температура подогрева увеличивается с ростом степени легирования стали. Однако независимо от скорости охлаждения металла и температуры подогрева металл все равно закаливается и приобретает высокую твердость и низкую ударную вязкость из-за образования твердой и хрупкой мартенситной структуры. Высокотемпературный подогрев приводит к перегреву шва и зоны термического влияния, при этом увеличивается размер зерна, снижается пластичность, ударная вязкость и прочность межзеренных границ.

Поэтому для уменьшения хрупкости металла шва необходимо тщательно выбирать сварочный материал, который обеспечивает двухфазную структуру наплавленного металла, в частности аустенитно-ферритного или аустенитного класса. Такой металл шва имеет повышенную пластичность за счет введения никеля и марганца, что уменьшает образование трещин. Однако коррозионная стойкость аустенитно-ферритных швов ниже, чем основного металла. Кроме того, различие в структурных классах основного металла и шва вызывают напряжения при эксплуатации из-за различия в коэффициенте теплового расширения.

Хорошие механические свойства сварных соединений можно получить при медленном охлаждении шва с выдержкой при температуре 100–150 °С около 2–3 часов; для завершения распада аустенита в мартенсит с последующей термической обработкой изделия в печи. Поэтому сразу после сварки сварные конструкции необходимо подвергать высокому отпуску для снятия остаточных напряжения и нормализации структуры.

Сварочные материалы, в зависимости от способа сварки и марки стали выбирают по табл. 8.

Таблица 8

Сварочные материалы для сварки хромистых сталей мартенситного, мартенситно-ферритного и ферритного класса

Марка свариваемой стали	Способ сварки			
	ручная дуговая	аргонодуговая	автоматическая под флюсом	
	Тип электрода по ГОСТ 10052-75 и марка электрода	Проволока сварочная по ГОСТ 2246-70	Проволока сварочная по ГОСТ 2246-70	Флюс
08X13	Э-12X13 (ЛМЗ-1, УОНИ-13 /НЖ 12X13, АНВ-1 и др)	Св-12X13 Св-08X14ГНТ	Св-12X13 Св-08X14ГНТ	АН-18 ГОСТ 9087 АН-26с ГОСТ 9087 48-ОФ-6 ОСТ 5.9206
08X13 08X17Т 14X17Н2 15X25Т	Э-10X25Н13Г2 (ОЗЛ-6, ЦЛ-25, и др)	Св-07X25Н13 Св-06X25Н12ТЮ Св-08X25Н13БТЮ	Св-07X25Н13 Св-06X25Н12ТЮ Св-08X25Н13БТЮ	АН-26с 48-ОФ-6 ОСТ 5.9206 АН-18 ГОСТ 9087
08X17Т	Э-10X17Т (УОНИ/10X17Т)	Св-10X17Т	Св-10X17Т	48-ОФ-6 ОСТ 5.9206

Марка свариваемой стали	Способ сварки			
	ручная дуговая	аргонодуговая	автоматическая под флюсом	
	Тип электрода по ГОСТ 10052-75 и марка электрода	Проволока сварочная по ГОСТ 2246-70	Проволока сварочная по ГОСТ 2246-70	Флюс
08X17T 15X25T	Э-10X25Н13Г2Б (ЦЛ-9, ЗИО-7, ЭА-48М/22 и др) 10X20Н15ФБ (АНВ-9) 10X20Н15Б (АНВ-10) Э-08X20Н9Г2Б (ЦЛ-11) Э-10X261113Г2Б (ЦЛ-9, АНВ-35)	Св- 06X25Н12ТЮ Св- 08X25Н13БТЮ	Св- 06X25Н12ТЮ Св- 08X25Н13БТ Ю	АН-26с ГОСТ 9087 48- ОФ-6 ОСТ 5 9206
14X17Н2	10X18Н2 (АНВ-2)	Св-08X14ГНТ	Св-08X14ГНТ	АН-26с ГОСТ 9087 48- ОФ-6 ОСТ 5 9206
15X11МФ 15X12ВНМФ 18X11МНФБ 13X11Н2В2МФ 12X11В2МФ 10X12НД 06X12Н3Д	КТИ-9, КТИ-10 тип Э- 12X11НМФ; ЭА- 395/9 тип Э- 11X15Н25М6АГ2; ЗИО-7, ЗИО-8 тип Э-10X25Н13Г2; ЦЛ-32 тип Э- 14X11НВМФ	Св- 15X12ГНМВФ; Св-01X12Н2-ВИ	Св- 15X12ГНМВФ ; Св-01X12Н2- ВИ	АН-17; ОФ-6; ФЦ-19; АН-45

Марка свариваемой стали	Способ сварки			
	ручная дуговая	аргонодуговая	автоматическая под флюсом	
	Тип электрода по ГОСТ 10052-75 и марка электрода	Проволока сварочная по ГОСТ 2246-70	Проволока сварочная по ГОСТ 2246-70	Флюс
08X13 12X13 20X13 08X14МФ 14X17Н2	марки ОЗЛ-6, ЦЛ-25 тип Э-10X25Н13Г2; ЦЛ-9 тип Э-10X25Н13Г2Б; АНВ-9 тип Э-08X20Н15ФБ; АНВ-10 тип Э-08X20Н15Б; УОНИ-13/НЖ, АНВ-1, ЦЛ-51 тип Э-12X13; ЭА-395/9 тип Э-11X15Н25М6АГ2; ЗИО-8, ЦЛ-25 тип Э-10X25Н13Г2, АНВ-2 тип Св-10X18Н2	Св-06X25Н12Т, Св-08X25Н13БТЮ, Св-07X25Н12Г2Т, Св-04X20Н5М6Б, Св-07X25Н13	Св-08X25Н13БТЮ, Св-07X25Н12Г2Т, Св-06X25Н12ТЮ, Св-07X25Н13, Св-08X18Н2ГТ, Св-08X14ГНТ	АН-26с, АНФ-14, ОФ-6, АН-18, АН-26
08X17Т 15X25Т 08X23С2Ю	ЦЛ-9, УОНИ/10X17Т, ЗИО-7, ЭА-48М/22, АНВ-9, АНВ-10, ЦТ-33, ЦТ-38, ЦЛ-25, ЦТ-45, ЭА-400/10Т, ЦТ-52	Св-07X25Н13, Св-02X18М26-ВИ	Св-10X17Т, Св-07X25Н13	АНФ-6, ОФ-6, АН-26с, АНФ-14, АН-16

Склонность сталей мартенситного класса к образованию трещин уменьшается с увеличением содержания никеля и с уменьшением содержания углерода. При сварке сталей с повышенным содержанием никеля температура подогрева может быть уменьшена до 100–200 °С. Для сварки таких сталей применяют сварочный материал, который аналогичен основному металлу и имеет пониженное содержание углерода до 0,02–0,08 %.

Основной трудностью при сварке сталей ферритного класса является рост зерна в шве и зоне термического влияния, который сопровождается уменьшением пластичности и ударной вязкости. На участке перегрева размер зерна может достигать 1 мм, при этом ширина участка составляет 2,5–3 мм. Для уменьшения образования холодных трещин необходим подогрев до 150–200 °С. Однако подогрев способен снизить пластичность и ударную вязкость из-за уменьшения скорости охлаждения в критическом интервале температур – около 475 °С.

Для снижения роста зерна следует уменьшать погонную энергию сварки и силу сварочного тока. Одним из способов увеличения глубины проплавления металла является применение активирующих флюсов, которые способствуют сжатию сварочной дуги.

В качестве сварочного материала выбирают материалы, которые обеспечивают наплавленный металл аустенитного класса. Для снижения остаточных напряжений рекомендуется отжиг при 760–780 °С в течение 2 часов. Большое значение для микроструктуры и механических свойств имеет содержание примесей и остаточных газов. Основными способами сварки сталей ферритного класса является сварка покрытыми электродами, механизированная сварка плавящимся электродом, аргонодуговая сварка вольфрамовым электродом и сварка под слоем флюса.

По мнению Липпольда Д.С. и Котеки Д.Д. свариваемость супермартенситных сталей по сравнению с мартенситными сталями лучше. За счет снижения углерода формируется мартенсит с более низкой твердостью: около 30 HRC (300 HV). Это позволяет избежать холодных трещин при наличии диффузионного водорода. Для увеличения твердости стали и компенсации снижения углерода в супермартенситные стали

вводят никель. В качестве сварочных материалов выбирают материалы, которые близки по химическому составу основному свариваемому металлу с повышенным содержанием хрома. После сварки высоколегированных супермартенситных сталей с содержанием хрома более 22 % рекомендуется послесварочный отпуск в течение 5 минут с нагревом до 650 °С и последующей закалкой в воде. Это позволяет избежать межкристаллитной коррозии.

2.4. Технология сварки жаропрочных и коррозионностойких сталей аустенитного класса

Стали аустенитного класса имеют высокое содержание хрома (более 14–16 %) и никеля (более 7 %). Номенклатура сталей отличается большим разнообразием. Данные стали характеризуются высокой коррозионной стойкостью, жаропрочностью, жаростойкостью. В отличие от углеродистых сталей, у сталей аустенитного класса при закалке увеличивается пластичность. Структура сталей определяется наличием ферритизаторов (Cr, Si, Mo, Al, Ti, Nb, W, V) и аустенизаторов (Ni, Mn, C, Co, Cu, B, N), табл. 9, 10.

Таблица 9

Химический состав жаропрочных сталей аустенитного класса

Марка стали	Содержание химических элементов, %						
	C	Si	Mn	Cr	Ni	W	Прочие
08X16H9M2	0,08	0,6	1–1,5	15,5–17	8,5–10	–	Mo 1–1,5; Nb 0,9–1,3
10X14H16Б	0,07– 0,12	0,6	1–2	13–15	14–17	–	–
10X18H12Т	0,15	0,75	1–2	17–19	11–13	–	Ti 0,5–0,7;
10X14H14B2M	0,07– 0,12	0,8	0,7	13–15	13–16	3–4	Mo 0,45–0,6
10X16H14B2BP	0,07– 0,12	0,6	1–2	15–18	13–15	2–2,75	B 0,005; Nb 0,9–1,3
09X14H18BBP	0,07– 0,12	0,6	1–2	13–15	18–20	2–2,75	B 0,005–0,02; Nb 0,9–1,3

Марка стали	Содержание химических элементов, %						
	C	Si	Mn	Cr	Ni	W	Прочие
10X15H18B4T	0,07–0,12	0,5	0,5–1	14–16	18–20	4–5	Ti 1,1–1,6; B 0,005–0,025
10X14H18B2BP1	0,07–0,12	0,6	1–2	13–15	18–20	2–2,75	B 0,011–0,016; Nb 0,9–1,3
20X23H13	0,2	1	2	22–25	12–15	–	–
08X23H18	0,1	1	2	22–25	17–20	–	–
1X15H25M6A	0,12	0,5–1	1–2	15–17	24–27	–	Mo 5,5–7; B 0,1–0,2
40X18H25C2	0,32–0,4	1,5	2–3	17–19	23–26	–	–
20X25H20C2	0,2	2–3	1,5	24–27	18–21	–	–
10X12H20T3P	0,1	1	1	10–12,5	18–21	–	Ti 2,3–2,8; B 0,5–0,008
10X15H35BT	0,12	0,6	1–2	14–16	34–38	2,8–3,5	Ti 1,1–1,5;
X15H35BTP	0,1	0,6	1	14–16	35–38	4–5	Ti 1,1–1,5; B 0,25–0,005

Таблица 10

Химический состав коррозионностойких сталей аустенитного класса по ГОСТ 5632-72

Марка стали	Содержание химических элементов, %					Прочие
	C	Si	Mn	Cr	Ni	
08X18H10	<0,08	<0,8	<2	17–19	9–11	S<0,02; P<0,035
08X18H10T	<0,08	<0,8	<2	17–19	9–11	S<0,02; P<0,035; Ti 0,4–0,7
12X18H10T	<0,12	<0,8	<2	17–19	9–11	S<0,02; P<0,035; Ti 0,6–0,8
03X18H11	<0,03	<0,8	<2	17–19	10,5–12,5	S<0,02; P<0,035
06X18H11	<0,06	<0,8	<2	17–19	10–12	S<0,02; P<0,035
08X18H12Б	<0,08	<0,8	<2	17–19	11–13	Nb 0,8–1,1; S<0,02; P<0,035
10X14Г14Н4Т	<0,1	<0,8	13–15	13–16	2,8–4,5	S<0,02; P<0,035; Ti 0,4–0,8

Марка стали	Содержание химических элементов, %					Прочие
	C	Si	Mn	Cr	Ni	
10X14AG15	<0,1	<0,8	14,5–16,5	13–15	–	N ₂ 0,15–0,25; S<0,03; P<0,045
07X21Г7АН5	<0,07	<0,7	6–7,5	19,5–21	5–6	N ₂ 0,15–0,25; S<0,03; P<0,03
08X17Н13М2Т	<0,08	<0,8	<2	16–18	12–14	Mo 2,5–3,5; S<0,02; P<0,035; Ti 0,4–0,7
10X17Н13М3Т	<0,1	<0,8	<2	16–18	12–14	Mo 3,5–4; S<0,02; P<0,035; Ti 0,5–0,7
08X17Н15М3Т	<0,08	<0,8	<2	16–18	14–16	Mo 3–4; S<0,02; P<0,035; Ti 0,3–0,6
03X16Н15М3	<0,03	<0,6	<0,8	15–17	14–16	Mo 2,5–3,5; S<0,015; P<0,03
03X21Н21М4ГБ	<0,03	<0,6	<2,5	20–22	20–22	Mo 3,4–3,7; Nb 0,45–0,8; S<0,02; P<0,03
02X8Н22С6	<0,02	5,4–6,7	<0,6	7,5–10	21–23	S<0,02; P<0,025
15X18Н12С4ТЮ	0,12–0,17	3,8–4,5	0,5–1	17–19	11–13	Al 0,13–0,35; S<0,03; P<0,035; Ti 0,4–0,7

Свариваемость аустенитных сталей осложняется из-за многокомпонентного легирования, которое приводит к образованию горячих трещин. Для их предупреждения нельзя перегревать металл, необходимо ограничивать силу тока, заполнять разделки валиками малого сечения, делать технологические перерывы, выбирать оптимальную конструкцию сварного соединения.

Для предупреждения горячих трещин следует ограничивать содержание вредных примесей в наплавленном металле, снижать долю основного металла в сварном шве. При сварке покрытым электродом необходимо применять обратную полярность, сварку вести короткой дугой без поперечных колебаний. Это нужно для получения сварного шва узкой формы.

Высоколегированные аустенитные стали обладают в 2 раза меньшей теплопроводностью, чем углеродистые стали. Это способствует

увеличению глубины проплавления, но следует учитывать, что одновременно возрастает коробление деталей, так как эти стали имеют высокий коэффициент теплового расширения. Поэтому для уменьшения сварочных деформаций необходимо применять высокопроизводительные способы сварки с максимальной концентрацией ввода теплоты в изделие.

При сварке в защитных газах следует пристальное внимание обращать на надежность газовой защиты, обеспечивать оптимальный расход газа, обеспечивать его устойчивое ламинарное течение, уменьшать расстояние от сопла горелки до изделия, увеличивать скорость сварки. Перед сваркой электроды и флюсы обязательно прокаливают, осушают защитные газы, очищают и обезжиривают детали и сварочную проволоку.

В составе сталей стремятся получить двухфазную аустенитно-ферритную структуру с содержанием ферритной фазы 3–5 %. Это необходимо для предупреждения роста зерна, получения мелкозернистой микроструктуры с высокой пластичностью и высокой коррозионной стойкостью. Для сварки под флюсом применяют высокоосновные неокислительные фторидные флюсы, а для ручной сварки – электроды с основным фтористокальциевым покрытием. Сварку выполняют на минимальной погонной энергии, уменьшают количество обрывов и повторных возбуждений сварочной дуги.

Слой сварного шва, который непосредственно контактирует с агрессивной средой следует сваривать последним, чтобы предотвратить его повторное нагревание. При повторном нагреве и перегреве увеличивается размер зерна, при этом уменьшается протяженность межзеренных границ, увеличивается их ширина, что ухудшает стойкость металла к межкристаллитной коррозии. 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 слой шва 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 внутрь свариваемых труб.

Сварочные материалы для сварки жаропрочных сталей, в зависимости от способа сварки и марки стали выбирают по табл. 11.

Таблица 11

Сварочные материалы для сварки жаропрочных сталей аустенитного класса

Марка свариваемой стали	Способ сварки			
	ручная дуговая	аргонодуговая	автоматическая	под флюсом
	Тип электрода по ГОСТ 10052-75 и марка электрода	Проволока сварочная по ГОСТ 2246-70	Проволока сварочная по ГОСТ 2246-70	Флюс
08X16H9M2 10X14H16B 10X18H12T 10X14H14B2M 10X16H14B2BP 09X14H18BBP 10X15H18B4T 10X14H18B2BP1 20X23H13 08X23H18 1X15H25M6A 40X18H25C2 20X25H20C2 10X12H20T3P 10X15H35BT X15H35BTP	ЦТ-26 тип Э-10X16H9M2, ЦТ-7, КТИ-5 тип Э-10X18H11M2Ф, ЦТ-5 тип Э-12X20H10MBФБ, ЦТ-16 тип Э-10X18H10B2Б, ЦТ-25 тип Э-12X16H9B4Б, ЦТ-23 тип Э-12X15H14B2Б, ЦТ-10 тип Э-12X15H25M6, АЖ-13-18 тип Э-12X14H18B2Б, КТИ-7 тип Э-30X13H35B3Б2, ОЗЛ-9А тип Э-40X25H6Г7, ЦТ-28 тип Э-06X15H60M15B6	Св-08X18H9Б, Св-08X16H8M2, Св-08X15H9B4Б, Св-10X16H25AM6, Св-06X15H35Г7B7M3T, Св-06X15H24B5T2P1, Св-07X25H50M9K9B2Г3	Св-08X18H9Б, Св-08X16H8M2, Св-08X15H9B4Б, Св-10X16H25AM6, Св-06X15H35Г7B7M3T, Св-06X15H24B5T2P1, Св-07X25H50M9K9B2Г3	АН-18, 48-ОФ-6М, АН-26, ФЦ-17, АНФ-23

Сварочные материалы для сварки коррозионностойких сталей, в зависимости от способа сварки и марки стали выбирают по табл. 12.

Таблица 12

Сварочные материалы для сварки коррозионностойких сталей
аустенитного класса

Марка свариваемой стали	Способ сварки			
	ручная дуговая	аргонодуговая	автоматическая	под флюсом
	Тип электрода по ГОСТ 10052-75 и марка электрода	Проволока сварочная по ГОСТ 2246-70	Проволока сварочная по ГОСТ 2246-70	Флюс
08X18H10 08X18H10T 12X18H10T 03X18H11 06X18H11 08X18H12Б 10X14Г14Н4Т 10X14АГ15 07X21Г7АН5 08X17Н13М2Т 10X17Н13М3Т 08X17Н15М3Т 03X16Н15М3 03X21Н21М4ГБ 02X8Н22С6 15X18Н12С4ТЮ	ОЗЛ-8 тип Э-07Х20Н9, ОЗЛ-7 тип Э-08Х20Н9Г2Б, ЦТ-15 тип Э-08Х19Н10Г2Б, АНВ-13 тип Э-02Х19Н9Б, ОЗЛ-22 тип Э-02Х21Н10Г2, ОЗЛ-14А тип Э-04Х20Н9, НЖ-13 тип Э-09Х19Н10Г2М2Б, ЭА-400/10У тип Э-07Х19Н11М3Г2Ф, АНВ-17 тип Э-02Х19Н18Г5АМЧ, ОЗЛ-20 тип Э-02Х20Н14Г2М2, АНВ-42 тип Э-02Х25Н24М3АГ3Д, ОЗЛ-24 тип Э-02Х17Н14С5	Св-06Х19Н9Т, Св-08Х20Н9Г7Т, Св-08Х19Н10Б, Св-05Х20Н9ФБС, Св-01Х19Н9, Св-06Х19Н10М3Т, Св-08Х19Н10М3Б, Св-06Х20Н11М3ТБ, Св-01Х19Н18Г10АМЧ, Св-01Х12Н11С6Ц	Св-06Х19Н9Т, Св-08Х20Н9Г7Т, Св-08Х19Н10Б, Св-05Х20Н9ФБС, Св-01Х19Н9, Св-06Х19Н10М3Т, Св-06Х20Н11М3ТБ, Св-01Х19Н18Г10АМЧ	АН-26, АН-26С, АН-45, АН-18

Сварочные материалы для сварки коррозионностойких сталей в среде защитных газов, в зависимости от требований стойкости против межкристаллитной коррозии выбирают по табл. 13.

Таблица 13

Сварочные материалы для сварки коррозионностойких сталей в среде
защитных газов

Марка стали	Марка проволоки, обозначение стандарта или технические условия	Защитный газ и обозначение стандарта	Условия применения, температура эксплуатации сварных соединений.	
			Без требований стойкости против межкристаллитной коррозии	При наличии требований стойкости против межкристаллитной коррозии
08X18H10	Св-04X19H9 Св-01X19H9 ГОСТ 2246	Аргон ГОСТ 10157 или смесь аргона с углекислым газом ГОСТ 8050	До 610°C	Не допускается
12X18H9Т 12X18H10Т 08X18H10Т	Св-01X19H9 Св-04X19H9 ГОСТ 2246	Аргон ГОСТ 10157 или смесь аргона с углекислым газом ГОСТ 8050	До 610°C	Не допускается
	Св-06X19H9Т Св-07X19H10Б Св-07X18H9ТЮ Св-05X20H9ФБС ГОСТ 2246		До 610°C	До 350°C Свыше 350°C до 610°C после отжига
	Св-08X20H9С2БТЮ ТУ 14-1-4981	Углекислый газ ГОСТ 8050	-	До 350°C
08X18H12Б	Св-06X19H9Т Св-07X19H10Б Св-07X18H9ТЮ Св-05X20H9ФБС ГОСТ 2246	Аргон ГОСТ 10157	До 610°C	До 350°C
03X18НП; 02X18H11	Св-01X18H10 ТУ 14-1-2795		До 450°C	До 450°C
03X19АГЗНШ	Св-01X18H10 ТУ 14-1-2795	Аргон ГОСТ 10157	До 450°C	До 350°C без требования равнопрочности
10X14П4Н4Т	Св-05X15H9Г6АМ ТУ 14-1-1595	Аргон ГОСТ 10157	До 500°C	До 350°C
03X21H21M4ГБ	Св-01X23H28M3ДЗТ ГОСТ 2246	Аргон ГОСТ 10157	-	До 350°C
08X17H15M3Т	Св-01X17H14M2 ТУ 14-1-2795			
03X17H14M3	Св-01X19H18Г10АМ4 ТУ 14-1-4981			

Марка стали	Марка проволоки, обозначение стандарта или технические условия	Защитный газ и обозначение стандарта	Условия применения, температура эксплуатации сварных соединений.	
			Без требований стойкости против межкристаллитной коррозии	При наличии требований стойкости против межкристаллитной коррозии
08X21H6M2T 10X17H13M2T 10X17H13M3T 08X17H13M2T	Св-06X19H10M3T Св-06X20H11M3TB Св-08X19H10M3B ГОСТ 2246 Св-01X19H18Г10АМ4 ТУ 14-1-4981	Аргон ГОСТ 10157 или смесь аргона с углекислым газом ГОСТ 8050	До 700°С	До 350°С
15X18H12C4TЮ	СВ-15X18H12C4TЮ ТУ 14-1-2795	Аргон ГОСТ 10157	-	До 200°С
02X8H22C6	СВ-02X8H22C6 ТУ 14-1-3233 Св-01X12H10C6Ц ТУ 14-1-3952			
015X14H19C6Б	Св-01X12H10C6Ц (ЭК-76) ТУ 14-1-3952	Аргон ГОСТ 10157	-	До 200°С
02X25H22AM2	СВ-01X23H23M3T	Аргон ГОСТ 10157	-	До 350°С
08X22H6T 08X18Г8H2T	СВ-06X21H7BT ТУ 14-1-4981 СВ-07X19H10B Св-07X18H9TЮ ГОСТ 2246	Аргон ГОСТ 10157	До 300°С	До 300°С
	Св-04X19H9 Св-06X19H9T ГОСТ 2246			
	Св-08X20H9C2BTЮ ТУ 14-1-4981	Углекислый газ ГОСТ 8050		
08X21H6M2T	Св-04X19H11M3 Св-06X19H10M3T	Аргон ГОСТ 10157, Гелий по ТУ 51-940 (высокой чистоты)	До 300°С	До 300°С
	Св-06X19H10M3B Св-08X19H10M3B Св-06X20H11M3TB			
10X23H18 20X23H18	Св-07X25H13 ГОСТ 2246 Св-08X25H20C2P1 ТУ 14-1-4981	Аргон ГОСТ 10157, Гелий по ТУ 51-940	До 1000°С	-

Покрытые электроды для сварки коррозионностойких сталей выбирают по табл. 14.

Таблица 14

**Покрытые электроды для сварки коррозионностойких сталей
аустенитного и аустенитно-ферритного классов с учетом требований по
межкристаллитной коррозии**

Марка стали	Требования по стойкости против межкристаллитной коррозии									
	Нет			Есть						
	Тип электрода по ГОСТ 10052	Марка электрода	Температура эксплуатации	Тип электрода по ГОСТ 10052 (марка. ТУ)	Марка электрода	Температура эксплуатации				
12X18H91 12X18H10T 08X18H10T 12X18H9TЛ 08X18H12Б 12X18H12T	Э-04Х20Н9	АНВ-32 ОЗЛ-36	До 450°С	Э- 08Х20Н9Г2Б	ЦЛ-11 ЗИФ-9	До 450°С. от 350°С до 450°С после отжига				
	Э-07Х20Н9	ОЗЛ-8 АНВ-29	До 610°С	Э- 08Х19Н10Г2Б	ЦТ-15	До 610°С. свыше 350°С после отжига				
08X18H10	Э-4Х20Н9 Э- 7Х20Н9	АНВ-32 ОЗЛ-36 ОЗЛ-8 ОЗЛ-12	До 610°С	Э-04Х20Н9	АНВ-32 ОЗЛ-36	До 350°С с предварительны м подтверждение м стойкости против межкристаллит ной коррозии				
03X18H11 02X18H11	Э-02Х21Н10Г2	АНВ-34 ОЗЛ-22	До 450°С	Э- 02Х21Н10Г2	АНВ-34 ОЗЛ-22	До 350°С				
	Э-02Х19Н9Б	АНВ-13		Э-02Х19Н9Б	АНВ-13	До 450°С				
03X19AG3H10	Э-02Х19Н9Б	АНВ-13	До 450°С	Э-02Х19Н9Б	АНВ-13	До 350°С				
10X14П4Н4Т	Э-03Х15Н9АГ4 Э-10Х20Н9Г6С Э-04Х20Н9	АНВ-24 ЗИФ-1 АНВ-32 ОЗЛ-36	До 500°С	Э- 08Х20Н9Г2Б	ЦЛ-11	До 350°С				
10X17H13M2 Т 10X17H13M3	Э- 07Х19Н11ШГ2 Ф	ЭА- 400/10У					До 450°С	Э- 07Х19Н11М3 Г2Ф	ЭА- 400/10У	До 350°С

Марка стали	Требования по стойкости против межкристаллитной коррозии					
	Нет			Есть		
	Тип электрода по ГОСТ 10052	Марка электрода	Температура эксплуатации	Тип электрода по ГОСТ 10052 (марка. ТУ)	Марка электрода	Температура эксплуатации
Т 12Х18Н12М3 ТЛ 08Х17Н13М2 Т	Э-02Х20Н14Г2М2	ОЗЛ-20	До 450°С свыше 450°С до 700°С при содержании ферритной фазы не более 6%			
	Э-02Х19Н18Г5АМ3	АНВ-17		Э-09Х19Н10Г2М2Б	НЖ-13 АНВ-36	
	Э-09Х1-9Н11Г3М2Ф	КТИ-5				
08Х17Н15М3 Т	-	-	-	Э-02Х19Н18Г5АМ3	АНВ-17	До 350°С
03Х17Н14М3	-	-	-	04Х23Н27М3 ДЗГ2Б ТУ 14-4-715	ОЗЛ-17У	До 350°С
				03Х24Н25М3 АГЗД ТУ ИЭС 375	АНВ-37	
03Х21Н21М4 ГБ	-	-	-	03Х24Н25М3 АГЗ ТУ ИЭС 376 04Х23Н27М3 ДЗГ2Б ТУ 14-4-715	АНВ-38 ОЗЛ-17У	До 350°С
20Х23Н18	Э-10Х25Н13Г2	ЗИО-8 ОЗЛ-6 ЦЛ-25	До 1000°С	-	-	-
08Х22Н6Т 08Х18Г8Н2Т	Э-04Х20Н9	ОЗЛ-36 АНВ-32	До 300°С	Э-08Х20Н9Г2Б	ЦЛ-11 Л38М ЗИФ-9	До 300°С
	-	-	-	Э-08Х19Н10Г2Б	ЦТ-15	-
	Э-07Х20Н9	ОЗЛ-8 ОЗЛ-14	-	-	-	-
	-	-	-	08Х22Н7Г2Б ТУ 1273-088-00187197	ОЗЛ-40	-

Марка стали	Требования по стойкости против межкристаллитной коррозии					
	Нет			Есть		
	Тип электрода по ГОСТ 10052	Марка электрода	Температура эксплуатации	Тип электрода по ГОСТ 10052 (марка. ТУ)	Марка электрода	Температура эксплуатации
08X21H6M2T	Э-02X20H14Г2М2	ОЗЛ-20	До 300°С	Э-09X19H10Г2М2Б	НЖ-13 АНВ-36	До 300°С
	Э-07X20H9	ОЗЛ-8 ОЗЛ-14	-	Э-07X19H11М3Г2Ф	ЭА-400/10У ЭА-400/10Т	-
	-	-	-	10X20H7M2Г2 Б ТУ 1273-088-00187197	ОЗЛ-41	-
15X18H2C4Т1	-	-	-	Э-10X17H13C4	ОЗЛ-3	До 200°С
02X8H22C6	-	-	-	03X17H14C5 ТУ 14-4-579	ОЗЛ-24	До 120°С

Сочетания сварочных материалов для сварки под флюсом выбирают по табл. 15.

Таблица 15

Сварочные материалы для автоматической и полуавтоматической сварки коррозионностойких сталей под флюсом

Марка стали	Наличие требований по стойкости против межкристаллитной коррозии					
	Нет			Есть		
	Марка проволоки, ГОСТ, ТУ	Марка флюса, ГОСТ, ТУ	Условия применения	Марка проволоки, ГОСТ, ТУ	Марка флюса, ГОСТ, ТУ	Условия применения
12X18H9Т 12X18H10Т 08X18H10Т	Св-06X19H9Т Св-04X19H9 Св-01X19H9 ГОСТ 2246	АН-26С ГОСТ 9087	До 610°С	Св-07X18H9ТЮ. Св-05X20H9ФБС ГОСТ 2246	АН-26С ГОСТ 9087	До 610°С от 350°С до 610°С после отжига
				Св-08X20H9C2БТЮ ТУ 14-1-4981		До 350°С

Марка стали	Наличие требований по стойкости против межкристаллитной коррозии					
	Нет			Есть		
	Марка проволоки, ГОСТ, ТУ	Марка флюса, ГОСТ, ТУ	Условия применения	Марка проволоки, ГОСТ, ТУ	Марка флюса, ГОСТ, ТУ	Условия применения
08X18H12Б	Св-07X18H9ТЮ Св-05X20H9ФБС	АН-26С ГОСТ 9087	До 610°С	Св-05X20H9ФБС ГОСТ 2246	АН-26С ГОСТ 9087	До 350°С Свыше 350°С до 610°С после отжига
03X18H11 02X18H11	-	-	-	Св-01X18H10 ТУ 14-1-2795 Св-01X19H9 ГОСТ 2246	АН-18 ГОСТ 9087	До 450°С
10X14П4Н4 Т	Св-05X15H9ГЛМ ТУ 14-1-1595	АН-26С ГОСТ 9087	До 500°С	-	-	-
10X17H13М 2Т 10X17H13М 3Т 08X17H13М 2Т	Св-06X19H10М3Т Св-04X19H11М3 ГОСТ 2246	АН-26С ГОСТ 9087. 48-ОФ-6 ОСТ 5 9206	-	Св-06X20H11М3ТБ Св-08X19H10М3Б ГОСТ 2246	АН-26С ГОСТ 9087. 48-ОФ-6 ОСТ 5 9206	До 350°С
08X17H15М 3Т	Св-06X19H10М3Т Св-04X19H11М3 Св-01X19H18Г10А М4 ГОСТ 2246	АН-26С ГОСТ 9087. 48-ОФ-6 ОСТ 5 9206	-	Св-06X20H11М3ТБ Св-08X19H10М3Б ГОСТ 2246	АН-26С ГОСТ 9087. 48-ОФ-6 ОСТ 5 9206	
03X17H14М 3	-	-	-	Св-01X17H14М2 ТУ 14-1-2795 Св-01X19H18Г10А М4 ТУ 14-1-4981	АН-18 ГОСТ 9087	До 350°С
03X21H21М 4ГБ	-	-	-	Св-01X23H28М3Д3 Т ГОСТ 2246		

Марка стали	Наличие требований по стойкости против межкристаллитной коррозии					
	Нет			Есть		
	Марка проволоки, ГОСТ, ТУ	Марка флюса, ГОСТ, ТУ	Условия применения	Марка проволоки, ГОСТ, ТУ	Марка флюса, ГОСТ, ТУ	Условия применения
08X22Н6Т 08X18Г8Н2Т	Св-04X19Н9 Св-06X19Н9Т ГОСТ 2246	АН-26С ГОСТ 9087	До 300°С	СВ-06X21Н7БТ (ЭП-500) ТУ 14-1-4981: Св-07X18Н9ТЮ: Св-	АН-26С ГОСТ 9087: 48-ОФ-6 ОСТ 5.9206	До 300°С
08X21Н6М2Т	СВ-04X19Н11М3 Св-06X19Н10М3Т	АН-26С ГОСТ 9087 48-ОФ-6	-	Св-08X19Н10М3Б: Св-		

Выбор сварочных материалов необходимо проводить с учетом допустимого содержания ферритной фазы, табл. 16.

Таблица 16

Допускаемое содержание ферритной фазы в металле шва или наплавленном металле

Марка сварочной проволоки	Температура эксплуатации соединения, °С	Содержание ферритной фазы, %, не более
Св-07X18Н9ТЮ Св-07X19Н10Б Св-07X25Н13 Св-07X25Н12ТЮ Св-04X19Н11М3 Св-06X19Н10М3Б Св-08X19Н10М3Б Св-06X19Н10М3Т Св-06X19Н10М3ТБ	до 350	не ограничивается
	свыше 350 до 450	10
	свыше 500 до 550	8
	свыше 550	6
Св-05X20Н9ФБС Св-08X20Н9С2БТЮ	до 350	не ограничивается
	свыше 350 до 450	10
	свыше 450 до 550	6
	свыше 550	4

В таблице 17 приведены свойства наплавленного металла при сварке различными способами сварки.

Таблица 17

Свойства металла шва хромистых сталей при ручной электродуговой сварке, механизированной сварке и сварке под флюсом

Способ сварки, сварочные материалы	Содержание легирующих элементов, %	Режим отпуска, температура, время	Предел прочности, кгс/мм ²	Пластичность, %	Ударная вязкость, а _н , Дж/см ²
РД: электроды: КТИ-9	0,1–0,13 С, 0,6–0,9 Мо, 0,6–0,9 Ni, 9,5–11,5 Cr, 0,2–0,4 V	730 °С, 5 ч	75	15	50
КТИ-10	0,1–0,13 С, 0,6–0,9 Мо, 0,6–0,9 Ni, 9,5–11,5 Cr, 0,2–0,4 V, 0,8–1,3 W	730 °С, 5 ч	75	15	50
ЦЛ-32	0,12–0,16 С, 0,9–0,12 Мо, 0,8–1,1 Ni, 10–12 Cr, 0,2–0,4 V, 0,9–1,2 W	730 °С, 7 ч	75	12	40
МП: СВ-08Х14ГНТ	< 0,1 С, 0,25–0,65 Si, 0,9–1,3 Mn, 12,5–14,5 Cr, 0,4–0,9 Ni, 0,8 Ti,	700 °С, 3 ч	74	18	65
СВ- 5Х12НМВФБ	0,15 С, 0,55 Мо, < 0,75 Ni, 11 Cr, 0,25 V, 0,6 W, 0,15 Nb	720 °С, 2 ч	97	12	55
АФ: СВ- 5Х12НМВФБ с флюсом АН-17	0,12 С, 0,85 Мо, 0,7 Ni, 10,3 Cr, 0,37 V, 1,2 W, 0,1 Nb, 0,8 Si	750 °С, 5 ч	78	18	55

Некоторые режимы электродуговой сварки нержавеющей сталей аустенитного класса приведены в табл. 18, 19, 20, 21, 22.

Таблица 18

Режимы ручной электродуговой сварки сталей аустенитного класса

Толщина деталей, мм	Электрод		Сила сварочного тока, А при положении детали:		
	диаметр, мм	длина, мм	нижнее	вертикальное	потолочное
<2	2	150–200	30–50	–	–
2,5–3	3	225–250	70–100	50–80	45–75
3–8	3–4	250–300	85–140	75–130	65–120
8–12	4–5	300–400	85–60	75–150	65–130

Сварку под флюсом часто используют для соединения деталей толщиной 8–50 мм. Преимуществом автоматической сварки под слоем флюса является непрерывность сварного шва, отсутствие повторных возбуждений и обрывов дуги. Процесс сварки под флюсом отличается высокой стабильностью горения дуги, отсутствием разбрызгивания, хорошей защитой и формированием сварного шва.

При сварке в среде защитных газов используют как инертные газы, так и активные газы. Наилучшие результаты обеспечивает сварка вольфрамовым электродом и плавящимся электродом в среде инертного газа. При сварке вольфрамовым электродом применяют ток прямой полярности. Сварку плавящимся электродом в среде инертного газа ведут на токе обратной полярности, при этом обеспечивается мелкокапельный и струйный перенос электродного металла, отсутствует разбрызгивание и угар легирующих элементов. При сварке в среде углекислого газа угар возрастает до 50 %, поэтому используют сварочные проволоки с высоким содержанием раскислителей и карбидообразователей (Al, Ti, Nb).

Таблица 19

Ориентировочные режимы механизированной сварки сталей аустенитного класса в среде аргона

Толщина деталей, мм	Вид соединения	Диаметр проволоки, мм	Сила сварочного тока, А	Вылет электрода, мм	Напряжение дуги, В	Расход аргона, л/мин
1,5	Стыковое без разделки	1–1,2	65–110	8–12	18–20	10–12
2		1–1,2	90–130	8–12	18–20	10–12
3		1,2–1,6	90–150	12–16	19–22	12–14
4		1,2–1,6	110–170	12–16	19–22	12–14
5	Стыковое с разделкой 60°	1,6–2	160–220	16–20	20–22	14–16
6		1,6–2	200–260	16–20	20–22	14–16
8		1,6–2	240–300	16–20	22–25	16–20
12		1,6–2	280–300	16–30	25–28	16–20

Таблица 20

Ориентировочные режимы механизированной сварки сталей аустенитного класса в углекислом газе

Толщина деталей, мм	Зазор между кромками, мм	Диаметр проволоки, мм	Сварочный ток, А	Расход газа, л/мин	Напряжение дуги, В	Вылет электрода, мм
1	–	0,5	30–60	5	16–17	6–8
1,5	–	0,5–0,6	40–80	6	16–17	6–8
2	–	0,6–0,8	50–100	8	17–18	7–9
3	0,5	0,8–1,2	70–120	9	18–20	8–10
4,5	0,5	1,2–1,6	120–180	10–12	20–25	10–12
8	1	1,6–2	150–280	12–14	25–30	12–14
10	1	2	250–400	16–18	28–35	14–18

Таблица 21

Ориентировочные режимы ручной аргонодуговой сварки сталей
аустенитного класса

Толщина деталей, мм	Вид соединения	Диаметр электрода, мм	Диаметр сварочной проволоки, мм	Сила сварочного тока, А	Скорость сварки, м/ч	Расход аргона, л/мин
0,5	Стыковое с отбортовкой	0,8–1	–	25–35	18–22	3,5–4
0,8	Стыковое без разделки и без присадки	1–1,6	–	40–50	10–17	3,5–4,5
1,0		1,6–2	–	35–65	9–15	4–5
1,5		1,6–2	–	45–75	8–11	4–5
2,0		2–2,5	–	70–85	7–9	5–6
3,0		2,5–3	–	90–110	5–8	5–6
4,0		2,5–3	–	100–140	4,5–7	6–7
3,0	Стыковое с V– образной разделкой и с присадкой	2,5–3	1,2–1,6	80–90	4–6	6–7
4,0		2,5–3	1,6–2	90–100	3–5	7–8
5,0		3–4	1,6–2	90–110	2,5–4	8–10
6,0		3–4	2–3	100–120	2–3	8–10
10,0		3–4	2–3	140–180	1,5–2	12–14

**Ориентировочные режимы автоматической сварки под флюсом
коррозионностойких сталей**

Толщина свариваемого металла, мм	Диаметр сварочной проволоки, мм	Сварочный ток, А	Напряжение на дуге, В	Скорость сварки, м/ч	Скорость подачи сварочной проволоки, м/ч	Величина вылета проволоки, мм
5-8	4	520-550	32-34	35	49,5	40-50
10	4-5	560-600	34-36	35	55,5	
12	4-5	625-650	34-38	31	60,0	
14	4-5	650-675	36-38	31	64,0	
16	4-5	700-725	36-38	25	70,0	
18	5	725-750	38-40	25	75,0	
20	5	725-750	38-40	25	75,0	
22-50	5	750-775	38-42	25	81,0-95,0	

2.5. Технология сварки высокомарганцовистых, высокоазотистых и супераустенитных сталей

Для увеличения прочности и стойкости к питтинговой коррозии применяют нержавеющие стали марок 304L, 316L, 304LN, 316LN с содержанием азота в количестве от 0,10 до 0,16 % (по данным Липпольда и Котеки).

Другая группа сталей серии 200 под торговыми марками Nitronic и GallTough имеют высокое содержание марганца — до 15 %. введение марганца позволяет увеличить растворимость азота в аустените, что предотвращает выделение нитридов хрома и снижение механических и коррозионных свойств стали. Такие стали могут содержать азота до 0,40 %.

Третья группа супераустенитных сталей имеет повышенную стойкость к коррозионному растрескиванию под напряжением и питтинговой коррозии по сравнению с аустенитными стандартными сталями. Общая группа включает в себя марки AL-6XN и 254SMo.

Номинальный состав этих сталей: 20 % хрома; от 18 до 25 % никеля; от 6 до 7 % молибдена и от 0,15 до 0,25 % азота. Химический состав других азотосодержащих сталей общей группы приведен в табл. 23.

Вследствие высокого содержания азота и марганца ранние структурные диаграммы Шеффлера и Делонга не позволяют точно прогнозировать микроструктуру и склонность к растрескиванию. Для этих сталей разработана модификация диаграммы Шеффлера, рис. 16.

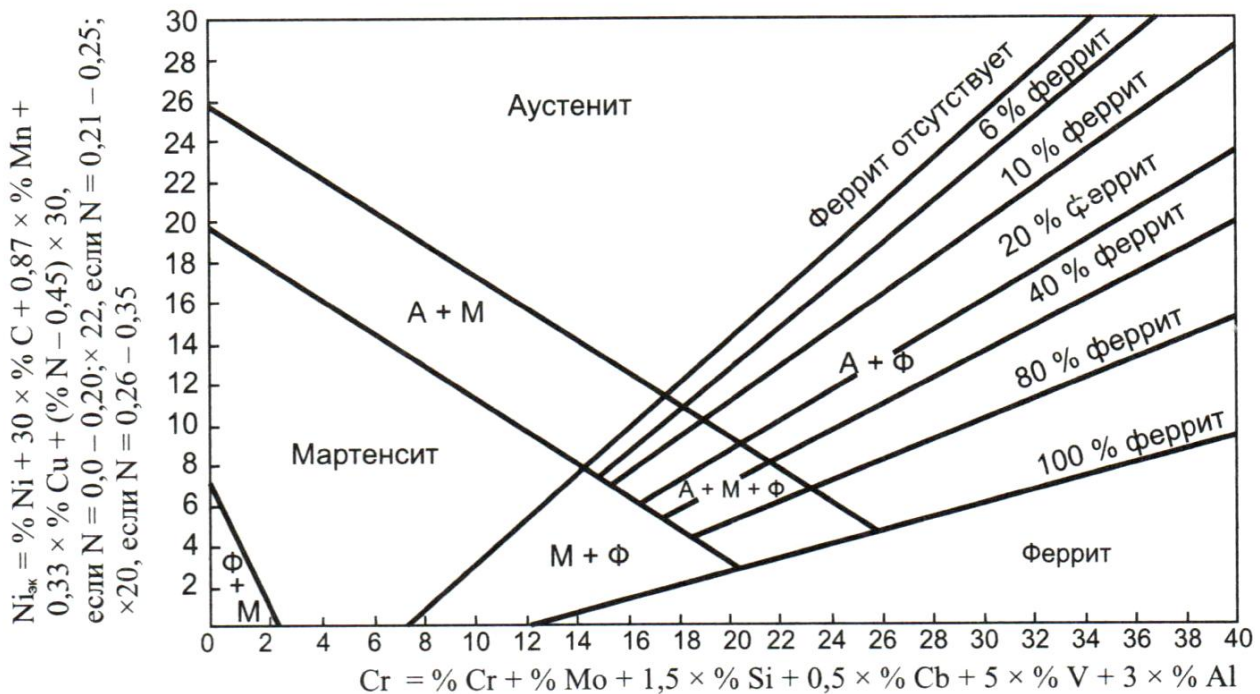


Рис. 16. Диаграмма Шеффлера, модифицированная для высокоазотистых и высокомарганцовистых сталей [Espy R.H. 1982. Weldability of nitrogen-strengthened stainless steels. Welding Journal, 61(5): s. 149-156]

Для предупреждения трещин необходимо обеспечить получение ферритно-аустенитной микроструктуры в наплавленном металле. Из-за повышенного содержания кремния указанные стали особенно склонны к кристаллизационному растрескиванию, если имеет место образование первичного аустенита (кристаллизация типа AF или A). Возможно возникновение определенных сложностей с данными сталями в условиях

электронно-лучевой и лазерной сварки вследствие образования пористости. Высокие скорости кристаллизации при этих способах сварки приводят к пересыщению азотом жидкого металла сварочной ванны и образованию зародышей азотных пор.

В табл. 23 указаны химические составы современных сталей.

Таблица 23

Химический состав высокоазотистых аустенитных сталей

Марка	Содержание химических элементов, max, %							PRE _N
	C	Si	Mn	Cr	Ni	N	Прочие	
Стандартные стали								
304LN	0,02	0,4	1	19	10	0,13	-	21
316LN	0,02	0,4	1	17	12	0,13	Mo: 2,2	26
317LN	0,02	0,4	1	19	13	0,15	Mo: 3,3	32
317LMN	0,02	0,4	1	18,5	15,5	0,16	Mo: 4,5	36
Высокомарганцовистые стали								
Nitronic 30	0,02	0,5	8	16	2,25	0,23	-	20
Nitronic 32	0,08	0,5	18	18	-	0,5	Mo: 1; Cu: 1	25
Nitronic 33	0,04	0,4	13	18	3	0,3	-	23
Nitronic 40	0,04	0,5	9	20	6,5	0,28	-	24
Nitronic 50	0,04	0,4	5	22	12,5	0,3	Mo: 2,25; Nb: 0,2	34
Nitronic 60	0,05	4	8	17	8,5	0,13	-	19
Gall-Tough	0,15	3,5	5	16,5	5	0,15	Mo: 3,5	30
Супераустенитные стали								
254SMo	0,01	0,4	0,5	20	18	0,2	Mo: 6,25; Cu: 0,75	44
AL-6XN	0,02	0,5	1	21	24,5	0,22	Mo: 6,5	46
$PRE_N = Cr + 3,3 (Mo + 0,5W) + 16N$								

Сварочные материалы для сварки высокомарганцовистых и высокоазотистых аустенитных сталей указаны в табл. 24, для сварки супераустенитных сталей в табл. 25.

Таблица 24

Химический состав присадочных материалов для сварки высокомарганцовистых и высокоазотистых аустенитных сталей по классификации AWS, %

Тип по AWS и марка стали	Содержание химических элементов, max, %							PRE _N
	C	Si	Mn	Cr	Ni	N	Прочие	
Покрытые электроды								
E240-XX Nitronic 33	0,04	0,4	12	18	5	0,2	-	21
E219-XX Nitronic 40	0,04	0,5	9	20	6	0,2	-	23
E209-XX Nitronic 50	0,04	0,4	5,5	22	11,5	0,2	Mo: 2,25; V: 0,2	33
Сварочная проволока								
ER240 Nitronic 33	0,03	0,4	12	18	5	0,2	-	21
ER219 Nitronic 40	0,03	0,4	9	20	6	0,2	-	23
ER209 Nitronic 50	0,03	0,4	5,5	22	10,5	0,2	Mo: 2,25; V: 0,2	33
ER218 Nitronic 60	0,06	4	8	17	8,5	0,13	-	19
$PRE_N = Cr + 3,3 (Mo + 0,5W) + 16N$								

Супераустенитные нержавеющие стали имеют исключительно высокую стойкость к коррозионному растрескиванию под напряжениями и питтинговой коррозии по сравнению со стандартными аустенитными сталями типа «18-8». Исключительная коррозионная стойкость достигается увеличением содержания никеля, молибдена и азота.

Большинство марок супераустенитных сталей имеет химический состав с содержанием элементов: хрома – от 20 до 25 %; никеля – от 15 до 25 %; молибдена от 4 до 8 %; углерода – от 0,01 до 0,02 % и азота – от 0,2 до 0,6.

Принятым критерием оценки против питтинговой коррозии является эквивалент PRE_N (значение которого обычно более 45), определяемый по формуле:

$$PRE_N = Cr + 3(Mo + 0,5W) + 16N$$

Таблица 25

Химический состав присадочных материалов на основе никеля для сварки супераустенитных сталей по классификации AWS, %

Тип по AWS	Содержание химических элементов, max, %							PRE_N
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Fe	Прочие	
Покрываемые электроды								
ENiCrMo-3	0,05	0,4	0,5	21,5	9	3,5	Nb: 3,6	51
ENiCrMo-4	0,01	0,1	0,5	15,5	16	5,5	W: 3,75	74
ENiCrMo-10	0,01	0,1	0,5	21,25	13,5	4	W: 3	71
Сварочная проволока								
ERNiCrMo-3	0,04	0,3	0,5	21,5	9	1	Nb: 3,6	51
ERNiCrMo-4	0,01	0,05	0,5	15,5	16	5,5	W: 3,75	74
ERNiCrMo-10	0,01	0,05	0,3	21	13,5	4	W: 3	70
$PRE_N = Cr + 3,3 (Mo + 0,5W) + 16N$								

В супераустенитных сталях наблюдается пониженная стойкость к коррозии из-за сегрегации молибдена по границам зерен и обеднения молибденом центральной части дендритов и ячеек. Поэтому для усиления

стойкости к коррозии можно применять сварочные материалы на основе никеля с повышенным содержанием молибдена. Это позволяет замедлить диффузию молибдена и компенсировать обеднение молибдена в центральной зоне дендритов.

2.6. Технология сварки duplexных ферритно-аустенитных сталей

Дуплексные нержавеющие стали появились в промышленности с начала 1980 г. и получили название от состояния микроструктуры, в которой аустенит и феррит содержатся в равных пропорциях, табл. 26, рис. 17. Эти стали основаны на системе Fe-Cr-Ni-N, имеют высокую коррозионную стойкость в условиях нагружения, прочность, теплопроводность, низкий коэффициент теплового расширения и выраженные магнитные свойства. Дуплексные стали используют для строительства трубопроводов нефти и газа, в том числе и в море. Предел текучести сталей более 425 МПа (аустенитные стали имеют 210 МПа), однако могут охрупчиваться при температуре эксплуатации более 280 °С.

Таблица 26

Химический состав duplexных ферритно-аустенитных сталей по ASTM

Марка	Содержание химических элементов, max, %							Прочие
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N	
2304	0,03	1	2,5	21,5-24,5	3-5,5	0,05-0,6	0,05-0,2	Cu:0,05-0,6; S:0,03; P:0,04
2205	0,03	1	2	21-23	4,5-6,5	2,5-3,5	0,08-0,2	S:0,02; P:0,03
329	0,08	0,75	1	23-28	2-5	1-2	-	S:0,03; P:0,04
CD4MCu	0,04	1	1	24,5-26,5	4,75-6	1,75-2,25	-	Cu:2,75-3,25; S:0,04; P:0,04
CD4MCuN	0,04	1	1	24,5-26,5	4,7-6	1,7-2,3	0,1-0,25	Cu:2,7-3,3; S:0,04; P:0,04
255	0,04	1	1,5	24-27	4,5-6,5	2,9-3,9	0,1-0,25	Cu:1,5-2,5; S:0,03; P:0,04

2507	0,03	0,8	1,2	24-27	6-8	3-5	0,24-0,32	Cu:0,5; S:0,02; P:0,035
CD3M-WCuN	0,03	1	1	24-27	6,5-8,5	3-4	0,2-0,3	Cu:0,5-1; S:0,025; P:0,03; W:0,5-1

Низкий коэффициент теплового расширения, сравнимый с углеродистыми сталями облегчает процесс сварки разнородных сталей, однако препятствует из-за охрупчивания, проведению термообработки для снятия сварочных напряжений.

Сварочные материалы для сварки дуплексных ферритно-аустенитных сталей указаны в табл. 27.

Таблица 27

Химический состав сварочных материалов для сварки дуплексных ферритно-аустенитных сталей по AWS: A5.4; A5.9; A5.22

Марка	Содержание химических элементов, max, %							Прочие
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N	
E2209-XX	0,04	1	0,5-2	21,5-23,5	8,5-10,5	2,5-3,5	0,08-0,2	Cu:0,75; S:0,03; P:0,04
ER2209	0,03	0,9	0,5-2	21,5-23,5	7,5-9,5	2,5-3,5	0,08-0,2	Cu:0,75; S:0,03; P:0,03
E2209TX-X	0,04	1	0,5-2	21-24	7,5-10	2,5-4	0,08-0,2	Cu:0,5; S:0,03; P:0,04
E2552-XX	0,04	1	1	24-27	4-6	1,5-2,5	0,08-0,22	Cu:2,5-3,5; S:0,03; P:0,04
E2553-XX	0,06	1	0,5-1,5	24-27	6,5-8,5	2,9-3,9	0,1-0,25	Cu:1,5-2,5; S:0,03; P:0,04
E2553TX-X	0,04	0,75	0,5-1,5	24-27	8,5-10,5	2,9-3,9	0,1-0,2	Cu:1,5-2,5; S:0,03; P:0,04
ER2553	0,04	1	1,5	24-27	4,5-6,5	2,9-3,9	0,1-0,25	Cu:1,5-2,5; S:0,03; P:0,04
E2593XX	0,04	1	0,5-2,5	24,7-27	8,5-11	2,9-3,9	0,08-0,25	Cu:1,5-3; S:0,03; P:0,04
E2594-XX	0,04	1	0,5-2	24-27	8,5-10,5	3,5-4,5	0,2-0,3	Cu:0,75; S:0,03; P:0,04

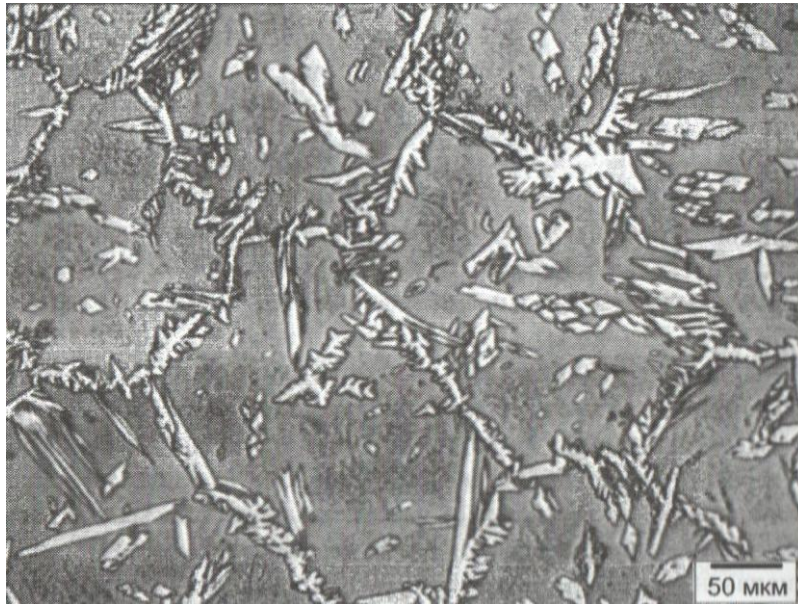


Рис.17. Микроструктура шва дуплексной стали с ферритным числом FN=70
[Данные Липпольда и Котеки]

По мнению Lippold J.C. склонность дуплексных сталей к образованию горячих трещин возрастает с увеличением отношения $Cr_{экв}/Ni_{экв}$ в пределах от 1,5 до 3, согласно диаграммы WRC-1992. Эти стали менее склонны к образованию кристаллизационных трещин, чем аустенитные и аустенитно-ферритные стали, однако при сварке нужно ограничивать поступление водорода. Диффузию водорода ограничивает образование аустенитной сетки, поэтому нужно стремиться к ограничению ферритного числа до 70 FN или подвергать сварные соединения отжигу.

2.7. Технология сварки дисперсионно-твердеющих сталей

Дисперсионно-твердеющие стали имеют высокую прочность до 1500 МПа, которая достигается за счет дисперсионного упрочнения при выделении дисперсных мартенситных фаз. По классификации, предложенной в монографии Липпольда и Котеки различают мартенситные, полуаустенитные и аустенитные дисперсионно-твердеющие стали, табл. 28. Эту сталь используют для изготовления газовых турбин, двигателей ракет, работающих при температуре до 300-650 °С.

Таблица 28

Химический состав дисперсионно-твердеющих сталей по ASTM

Марка, обозначение	Содержание химических элементов, max, %							Прочие
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	
Мартенситные стали								
XM-13 13-8Mo	0,05	0,1	0,2	12,25- 13,25	7,5-8,5	2-2,5	-	N:0,01; Al:0,9-1,35; S:0,008; P:0,01
XM-12 15-5PH	0,07	1	1	14-15,5	3,5-5,5	-	2,5-4,5	Nb:0,15-0,45; S:0,03; P:0,04
630 17-4PH	0,07	1	1	15-17,5	3-5	-	3-5	Nb:0,15-0,45; S:0,03; P:0,04
635	0,08	1	1	16-17,5	6-7,5	-	-	Ti:0,4-1,2; Al:0,4; S:0,03; P:0,04
XM-25 Custom450	0,05	1	1	14-16	5-7	0,5-1	1,25-1,75	Nb:8×C-0,75; S:0,03; P:0,03
XM-16 Custom455	0,05	0,5	0,5	11-12,5	7,5-9,5	0,5	1,5-2,5	Nb:0,15-0,45; Ti:0,8-1,4; S:0,03; P:0,04
Полуаустенитные стали								
632 15-7Mo	0,09	1	1	14-16	6,5-7,75	2-3	-	Al:0,75-1,5; S:0,03; P:0,04
631 17-7PH	0,09	1	1	16-18	6,5-7,75	-	-	Al:0,75-1,5; S:0,03; P:0,04
633 AM350	0,07- 0,11	0,5	0,5- 1,25	16-17	4-5	2,5- 3,25	-	N:0,07-0,13; S:0,03; P:0,04
634 AM355	0,1- 0,15	0,5	0,5- 1,25	15-16	4-5	2,5- 3,25	-	N:0,07-0,13; S:0,03; P:0,04

Марка, обозначение	Содержание химических элементов, max, %							Прочие
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	
Аустенитные стали								
662 Discaloy	0,08	1	1,5	12-15	24-28	2,5-3,5	-	Al:0,35; Ti:1,55-2; B:0,001-0,01; S:0,03; P:0,04
660 A-286	0,08	1	2	13,5-16	24-27	1-1,5	-	Al:0,35; Ti:1-1,5; B:0,001-0,01; V:0,1-0,5; S:0,03; P:0,04
JBK-75	0,01- 0,03	0,1	0,2	13,5-16	29-31	1-1,5	-	Al:0,15-0,35; Ti:2- 2,3; B:0,002; O:0,005; N:0,01; S:0,006; P:0,01

Аустенитные стали марок 660 (А-286), 662 называют суперсплавами на основе железа. Для уменьшения образования кристаллизационных трещин создали рафинированную сталь JBK-75, которая в частности применяется для изготовления сверхпроводящих магнитов. За исключением стали 17-4PH сварочные материалы с химическим составом идентичным основному металлу отсутствуют в классификации AWS и классифицируются в отраслевых документах по стандартам аэрокосмических материалов (AMS, Aerospace Materials Specifications), обществом автомобилестроителей SAE.

Некоторые присадочные материалы по классификации AMS приведены в табл. 29.

Таблица 29

Химический состав сварочных материалов для сварки дисперсионно-
твердеющих сталей по стандарту AMS

Марка, обозначение	Содержание химических элементов, max, %							Прочие
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	
Мартенситные стали								
5840 13-8Mo	0,05	0,01	0,1	12,25- 13,25	7,5- 8,5	2- 2,5	-	N:0,01; H:0,0025; Al:0,9-1,35; S:0,01; P:0,008

Марка, обозначение	Содержание химических элементов, max, %							Прочие
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	
5826 15-5PH	0,07	0,03	1	14- 15,5	3,5- 5,5	-	2,5- 4,5	Nb:0,15-0,45; S:0,03; P:0,04
5825 (AWS: ER630) 17-4PH	0,05	0,03	0,25- 0,75	16- 16,75	4,5- 5	-	3,25- 4	Nb:0,15-0,3; S:0,03; P:0,04
E630-XX	0,05	0,03	0,25- 0,75	16- 16,75	4,5- 5	0,75	3,25- 4	Nb:0,15-0,3; S:0,03; P:0,04
5763 Custom450	0,05	0,03	1	14-16	5-7	0,5- 1	1,25- 1,75	Nb:8×C-0,75; S:0,03; P:0,03
5617 Custom455	0,01	0,01	0,5	11- 12,5	7,5- 9,5	0,5	1,5- 3,5	N:0,01; Ti:1-1,35; S:0,01; P:0,01
Полуаустенитные стали								
5812 15-7Mo	0,09	0,5	1	14- 15,25	6,5- 7,75	2- 2,75	-	O:0,005; H:0,0025; Al:0,75-1,25; S:0,01; P:0,01
5824 17-7PH	0,09	0,5	1	16- 17,25	6,5- 7,75	-	-	Al:0,75-1,25; S:0,025; P:0,025
5774 AM350	0,08- 0,12	0,5	0,5- 1,25	16-17	4-5	2,5- 3,25	-	N:0,07-0,13; S:0,03; P:0,04
5780 AM355	0,1- 0,15	0,5	0,5- 1,25	15-16	4-5	2,5- 3,25	0,5	N:0,07-0,13; S:0,03; P:0,04
Аустенитные стали								
5805 A-286	0,04	0,01	0,35	13,5- 16	24- 27	1- 1,5	-	Al:0,35; Ti:1,9-2,3; B:0,003-0,005; V:0,1-0,5; O:0,005; N:0,005; H:0,0005; S:0,005; P:0,01
5811A JBK-75	0,01- 0,03	0,01	0,2	13,5- 16	29- 31	1- 1,5	-	Al:0,15-0,35; Ti:2- 2,3; B:0,002; V:0,1- 0,5; O:0,005; N:0,01; S:0,006; P:0,01

2.8. Технология сварки разнородных сталей

Разнородными сталями называются стали разного структурного класса, которые отличаются по физическим и металлургическим свойствам.

При разработке технологии сварки разнородных сталей необходимо учитывать различный характер свариваемости сталей, особенности фазовых переходов, требования к подогреву при сварке, термообработке, возможность образования холодных и горячих трещин, развития микрохимической неоднородности в сварных соединениях, возможность достижения необходимой степени легирования, химического состава, механических, эксплуатационных, служебных и специальных свойств сварных соединений.

При сварке разнородных малоуглеродистых и низколегированных сталей перлитного класса следует выбирать менее легированный сварочный материал, который обеспечивает более высокую пластичность и ударную вязкость. Однако, если сварное соединение эксплуатируется при высокой температуре, нужно обеспечивать наплавленный металл с необходимой теплоустойчивостью.

При сварке разнородных высоколегированных коррозионностойких сталей аустенитного, аустенитно-ферритного и ферритного классов, следует применять менее легированные сварочные материалы, которые обеспечивают аустенитную структуру металла шва с некоторым количеством ферритной фазы для получения мелкозернистой структуры.

Режимы предварительного и сопутствующего подогрева при сварке, режимы сварки, а также термической обработки должны приниматься по стали, которая обладает худшей свариваемостью с учетом легирования наплавленного металла шва.

При сварке высоколегированных сталей с углеродистыми сталями необходимо помнить о различии в теплопроводности, в коэффициенте линейного расширения, диффузии легирующих элементов. Поэтому, нужно обеспечить соответствие между ростом напряжений и ростом прочности сварного шва при процессах кристаллизации. Для устранения образования трещин применяют высоконикелевые материалы, которые

образуют пластичные слои, демпфирующие напряжения растяжения в сварном шве.

Выбор сварочных материалов для некоторых сочетаний свариваемых разнородных сталей приведен в табл. 30, 31.

Таблица 30

Сварочные материалы для сварки разнородных сталей в среде защитных газов и автоматической сварки под флюсом

Сочетание марок стали в сварном соединении (А+Б)		Марка проволоки	ГОСТ или ТУ	Марка флюса	Примечание, допустимая рабочая температура, условия сварки
А	Б				
Ст3кп, Ст3пс, Ст3сп, Ст3Гпс, 10, 15,20, 15К, 16К, 18К,20К, 22К	16ГС,09Г2С, 10Г2, 10Г2С1, 17ГС, 17Г1С, 10ХСНД, 15ХСНД	Св-08 Св-08А Св-08ГА	ГОСТ 2246	АН-348А ОСЦ-45	Возможен подогрев 100-250°С
	12МХ, 12ХМ, 15ХМ				
16ГС.09Г2С, 10Г2, 10Г2С1, 17ГС, 17ПС, 10ХСНД, 15ХСНД		Св-08ГА Св-08ГС Св-08Г2С Св-10НЮ	ТУ 14-1-2219	АН-348А ОСЦ-45 АН-22	
Ст3кп, Ст3пс. Ст3сп, Ст3Гпс. 10, 15,20, 15 К, 18К,20К,22К, 16ГС, 09Г2С, 10Г2, 10Г2С1, 17ГС,17Г1С, 10ХСНД, 15ХСНД	08Х13, 08Х17Т, 15Х25Т	Св-07Х25Н13 Св-07Х25Н12Г2Т	ГОСТ 2246	48-ОФ-6 АН-26С АН-18	
	08Х22Н6Т, 12Х18Н9Т, 08Х18Н10Т, 12Х18Н10Т, 08Х18Н10.	Св-07Х25Н13, Св-07Х25Н12Г2Т	ГОСТ 2246	48-ОФ-6 АН-26С АН-18	-
	08Х18Н12Б, 08Х18Г8Н2Т, 03Х18Н11,	Св-10Х16Н25АМ6			До 435°С
		Св-08Х25Н25М3	ТУ 14-1-4968		До 470°С

Сочетание марок стали в сварном соединении (А+Б)		Марка проволоки	ГОСТ или ТУ	Марка флюса	Примечание, допускаемая рабочая температура, условия сварки
А	Б				
	02X18H11. 08X17H13M2T, 10X17H13M2T, 10X17H13M3T, 08X17H15M3T, 08X21H6M2T, 03X17H14M3	Св-08X25H40M7			До 550°C
	03X21H21M4ГБ 06ХН28МДТ, 03ХН28МДТ, ХН30МДТ	Св-08X25H60M10			До 550°C
		Св-08X25H25M3			До 550°C
	Св-10X16H25AM6	ГОСТ 2246	Приемы против горячих трещин		
12MX. 12XM, 15XM	08X13, 08X17T, 15X25T, 08X22H6T, 12X18H9T, 08X18H10T. 12X18H10T, 08X18H10. 08X18Г8H2T, 03X18H11, 02X18H11, 08X17H13M2T, 10X17H13M2T, 10X17H13M3T, 08X17H15M3T, 08X21H6M2T, 03X17H14M3	Св-Х25H40M7 Св-08X25H60M10	ТУ 14-1-4968	АН-18	Подогрев 200-300°C. термообработка Соединения со сталями 08X13 08X17T и 15X25T
	03X21H21M4ГБ, 06ХН28МДТ, 03ХН28МДТ, ХН30МДБ				То же и приемы против горячих трещин

Сочетание марок стали в сварном соединении (А+Б)		Марка проволоки	ГОСТ или ТУ	Марка флюса	Примечание, допускаемая рабочая температура, условия сварки
А	Б				
08X13. 08X17Т, 15X25Т	08X22Н6Т, 12X18Н9Т, 08X18Н10Т, 12X18Н10Т, 08X18Н10, 08X18Н12Б, 08X18Г8Н2Т, 03X18Н11, 02X18Н11, 08X17Н13М2Т, 10X17Н13М2Т. 10X17Н13М3Т. 08X17Н15М3Т, 08X21Н6М2Т, 03X17Н14М3	Св-08X25Н25М3 Св-10X16Н25АМ6 Св-07X25Н12Г2Т Св-07X19Н10Б Св-06X25Н12ТЮ	ТУ 14-1- 4968 ГОСТ 2246	48- ОФ-6 АН- 26С АН-18	Возможен подогрев до 150-200°С При наличии требований по межкристаллитной коррозии только Св-07X19Н10Б. Св-06X25Н12ТЮ. для ненагруженных конструкций
	03X21Н21М4ГБ. 06ХН28МДТ, 03ХН28МДТ, ХН30МДБ				
12X18Н9Т. 08X18Н10Т, 12X18Н10Т 08X18Н10. 08X18Н12Б, 08X22Н6Т. 08X18Г8Н2Т, 03ХГ8Н11	08X17Н13М2Т. 10X17Н13М2Т, 10X17Н13М3Т. 08X17Н15М3Т. 06X21Н6М2Т. 03X17Н14М3	Св-04X 1 9Н9, Св-06X19Н9Т, Св-05X20Н9ФБС, Св-08X20Н9С2БТЮ. Св-07X18Н9ТЮ	ГОСТ 2246	АН- 26С 48- ОФ-6	-
08X17Н13М2Т. 10X17Н13М2Т, 10X17Н13М3Т, 08X17Н15М3Т, 08X21Н5М2Т. 03X17Н14М3	03X21Н21М4ГБ. 06ХН28МДТ, 03ХН28МДТ. ХН30МДБ	Св-1X19Н18Г10АМ4 Св-01X23Н28М3Д3Т	ТУ 14-1- 4981 ГОСТ 2246		Приемы против горячих трещин Проверка стойкости против межкристаллитной коррозии

Таблица 31

Электроды для ручной электродуговой сварки разнородных сталей

Сочетание марок в сварном соединении (А+Б)		Электроды			Примечание, допускаемая рабочая температура, условия сварки
А	Б	ГОСТ или ТУ	Тип*	Марка	
Ст3кп, Ст3пс, Ст3сп, Ст3Гпс, 10, 15, 20, 15К, 16К, 18К, 20К, 22К	16ГС, 09Г2С, 10Г2С1, 10Г2, 17ГС, 17Г1С. 10ХСНД. 15ХСНД	ГОСТ 9466 ГОСТ 9467	Э-42 Э-42А Э-46 Э-46А	АНО-5 УОНИ-13/45 АНО-4 АНО-8 и им равноценные	Э-42, Э-46 не ниже минус 15°С
	12МХ, 12ХМ, 15ХМ				Подогрев до 200-300°С, термообработка
	15Х5М				Подогрев до 300-350°С, термообработка непосредственно после сварки
16ГС, 09Г2С, 10Г2, 10Г2С1, 17ГС, 17ПС, 10ХСНД, 15ХСНД	12МХ, 12ХМ, 15ХМ	ГОСТ 9466 ГОСТ 9467	Э-50А	УОНИ-13/55 и им равноценные	Подогрев до 200-300°С, термообработка
	15Х5М				Подогрев до 300-350°С, термообработка непосредственно после сварки
Ст3кп, Ст3пс, Ст3сп, Ст3Гпс, 10, 15, 20, 15К, 16К, 18К, 20К, 22К	08Х13, 08Х17Т, 15Х25Т	ГОСТ 9466 ГОСТ 10052	Э-10Х25Н13Г2 и им равноценные	ЗИО-8, ОЗЛ-6 и им равноценные	Подогрев в зависимости от толщины и марки стали
	08Х22Н6Т, 08Х18Г8Н2Т, 12Х18Н9Т, 08Х18Н10Т, 12Х18Н10Т. 08Х18Н10, 08Х18Н12Б. 03Х18Н11. 02Х18Н11				До 400°С
	08Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М2Т, 08Х17Н15М3Т, 08Х21Н6М2Т, 03Х17Н14М3		ГОСТ 9466 ТУ 14-168-23	Э-11Х15Н25М6АГ2	ЭА-395/9 НИАТ-5 и им равноценные
16ГС, 09Г2С, 10Г2, 10Г2С1, 17ГС,	08Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М2Т, 08Х17Н15М3Т, 08Х21Н6М2Т, 03Х17Н14М3	ГОСТ 9466 ТУ 14-168-23	10Х25Н25М3Г2	АНЖР-3У	До 470°С

Сочетание марок в сварном соединении (А+Б)		Электроды			Примечание, допускаемая рабочая температура, условия сварки
А	Б	ГОСТ или ТУ	Тип*	Марка	
10ХСНД, 15ХСНД		ГОСТ 9466 ТУ 14-4-598	08Х24Н40М7Г2	АНЖР-2	До 550°С
		ГОСТ 9466 ТУ 14-4-568	08Х24Н60М10Г2	АНЖР-1	До 550°С
	03Х21Н21М4ГБ. 06ХН28МДТ. 03ХН28МДТ, ХН30МДБ	ГОСТ 9466 ГОСТ 10052	Э-11Х15Н25М6АГ2	НИАТ-5	Приемы против горячих трещин
		ГОСТ 9466 ТУ 14-168-23	10Х25Н25М3Г2	АНЖР-3У	
12МХ, 12ХМ, 15ХМ	15Х5М	ГОСТ 9466 ГОСТ 9467	Э-09МХ Э-09Х1М	ОЗС-11 ЦЛ-20-63 и им равноценные	Подогрев до 300-350°С, термообработка непосредственно после сварки

Продолжение таблицы 31

Сочетание марок в сварном соединении (А+Б)		Электроды			Примечание, допускаемая рабочая температура, условия сварки
А	Б	ГОСТ или ТУ	Тип*	Марка	
12МХ, 12ХМ,	08Х13, 08Х17Г, 15Х25Т	ГОСТ 9466	Э-10Х25Н13Г2	ОЗЛ-6 и им равноценные	Подогрев сталей 12МХ, 15МХ, 15ХМ до 200-300°С, 15Х5М до 300-350°С, термообработка. 08Х13, 08Х17Г, 15Х25Т-ДЛЯ ненагруженных конструкций
	08Х22Н6Г, 12Х18Н9Г. 08Х18Н10Т, 12Х18Н10Т, 08Х18Н10, 08Х18Н12Б, 08Х18Г8Н2Г, 03Х18Н11,	ГОСТ 9466 ГОСТ 10052 ТУ 14-4-598 ТУ 14-4-568	08Х24Н40М7Г2 08Х24Н60М10Г2 Э-11Х15Н25М6АТ2	АНЖР-2 АНЖР-1 ЭА-395/9	

Сочетание марок в сварном соединении (А+Б)		Электроды			Примечание, допускаемая рабочая температура, условия сварки
А	Б	ГОСТ или ТУ	Тип*	Марка	
15ХМ, 12Х1МФ, 15Х5М	02Х18Н, 08Х17Н13М2Т, 10ХН13М3Т, 10Х17Н13М2Т. 10Х17Н13М3Т, 10Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М3Т, 08Х17Н15М3Т, 08Х21 Н6М2Т, 03Х17Н14М3				
	03Х21Н21М4ГБ, 06ХН28МДТ, 03ХН28МИОТ, ХН30МДБ				
08Х13. 08Х17Т, 15Х25Т	08Х22Н6Т, 12Х18Н9Т, 08Х18Н10Т. 12Х18Н10Т, 08Х18Н12Б, 08Х18Г8Н2Т, 03Х18Н11, 02Х18Н11, 08Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М3Т, 08Х17Н15М3Т. 08Х21Н6М2Т. 03Х17Н14М3, 03Х21Н2М4ГБ, 06ХН28МДТ. 03ХН28МДТ, ХН30МДБ	ГОСТ 9466 ГОСТ 10052	Э- 11Х15Н25М6АГ2 Э-10Х25Н13Г2 Э-10Х25Н13Г2Б	НИАТ-5 ОЗЛ-6 ЦЛ-9 и им равноценные	Подогрев до 150-250°С - для ненагруженных конструкций

Продолжение таблицы 31

Сочетание марок в сварном соединении (А+Б)		Электроды			Примечание, допускаемая рабочая температура, условия сварки
А	Б	ГОСТ или ТУ	Тип*	Марка	
12X18H9T, 08X18H10T, 08X18H10, 08X18H12Б, 08X22H6T, 08X18Г8H2T, 03X18H11, 02X18H11	08X17H13M2T, 10X17H13M2T, 10X17H13M3T, 08X17H15M3T, 08X21H6M2T, 03X17H14M3	ГОСТ 9466 ГОСТ 10052	Э-07X20H9 Э-04X20H9 Э-08X20H9Г2Б	ОЗЛ-8 ОЗЛ-14А ЦЛ-11	Без требований по межкристаллитной коррозии, То же до 550°С При требовании по межкристаллитной коррозии до 350°С,
	03X21H21M4ГБ, 06XH28MДТ, 03XH28MДТ, ХН30МДБ	ГОСТ 9466 ТУ 14-4-715	03X23H27M3Д3Г2Б	ОЗЛ-17У и им равноценные	Приемы против горячих трещин
08X17H13M2T, 10X17H13M3T, 10X17H13M3T, 08X17H15M3T, 08X21H6M2T, 08X17H14M3		ГОСТ 9466 ГОСТ 10052	Э-02X19H18Г5АМ3	АНВ-17 и им равноценные	Без требований по межкристаллитной коррозии, приемы против горячих трещин
ПРИМЕЧАНИЕ: Для сочетаний, включающих коррозионностойкие стали аустенитно-ферритного класса, допускаемая рабочая температура не выше 300°С					

При сварке разнородных сталей нужно учитывать долю основного металла в наплавленном металле шва, согласно рекомендациям табл. 32.

Допускаемое максимальное содержание низкоуглеродистой или низколегированной конструкционной стали (степень проплавления) в металле шва

Предельное содержание конструкционной стали в металле шва, %	Марка проволоки	Тип электрода
30	Св-07Х25Н13 Св-07Х25Н12Г2Т Св-06Х25Н12ТЮ	Э-10Х25Н13Г2
45	Св-10Х16Н25АМ6 Св-08Х25Н25М3 (ЭП 622)	Э-11Х15Н25М6АГ2 10Х25Н25М3Г2
60	Св-08Х25Н60М10 (ЭП 606) Св-05Х30Н40М6ТБ (ЭП 829) Св-Х25Н40М7 (ЭП 673)	08Х24Н60М10Г2 08Х24Н40М7Г2
<p>ПРИМЕЧАНИЕ: 1. Контролируется при отработке технологического режима 2. Без индекса «Э» даны условные обозначения типов электродов, не предусмотренных ГОСТ 10052</p>		

Прогнозирование микроструктуры при сварке разнородных сталей

При сварке разнородных хромоникелевых сталей необходимо определять микроструктуру шва. Для прогнозирования микроструктуры можно использовать диаграмму Шеффлера и диаграмму WRC-1992. Для прогнозирования микроструктуры высокомарганцовистых сталей нужно применять модифицированную диаграмму WRC-1992. В качестве примера применения диаграммы Шеффлера для прогнозирования микроструктуры шва можно привести сварку низколегированной стали марки А508 по ASTM со сталью марки 304L, рис. 18. В качестве присадочных материалов применим марку 309L или 310.

При условии соотношения присадочного металла к основному металлу в корневом слое 30/70 % при сварке покрытым электродом,

химический состав шва находится на расстоянии 30 % на линии связи от точки марки 309L. Химический состав шва соответствует изоферритической линии 5 % феррита. Точки следующих проходов будут сдвинуты в область основного металла. Таким образом, использование сварочного материала марки 309L приведет к получению двухфазной аустенитно-ферритной структуры, с высоким сопротивлением к образованию кристаллизационных трещин.

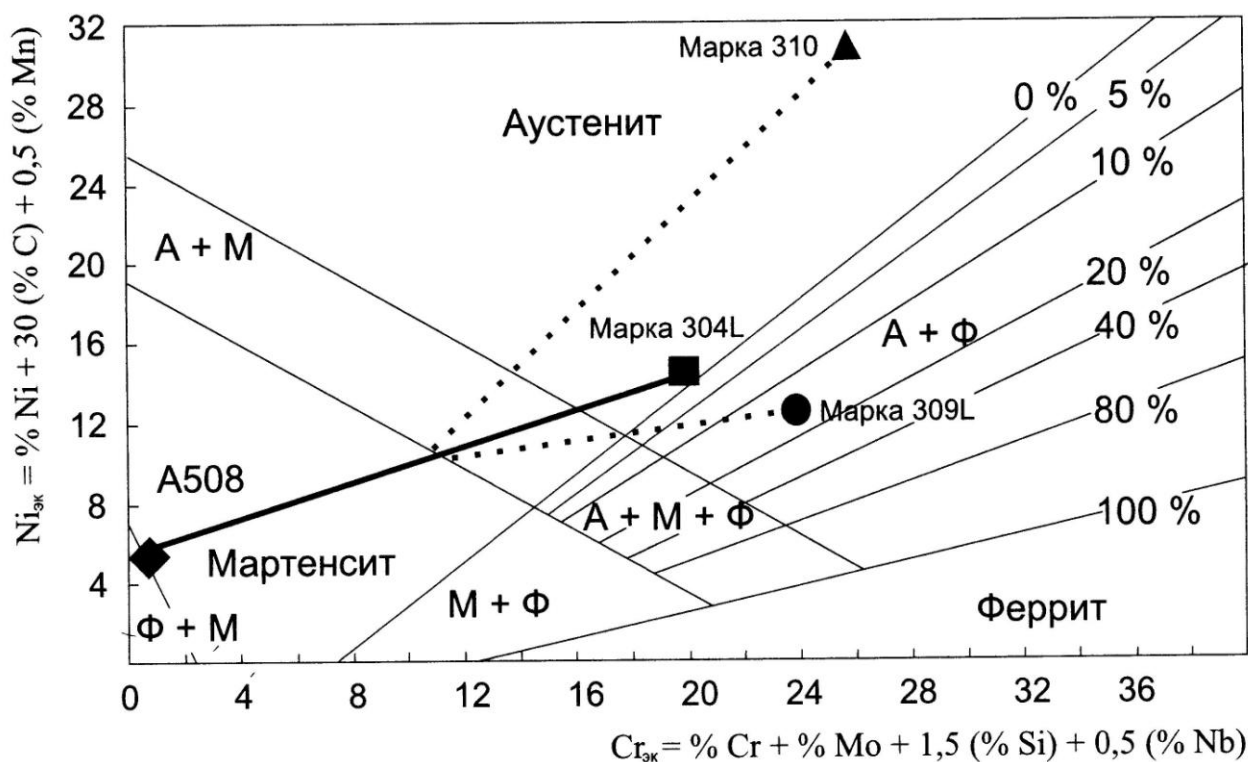


Рис. 18. Прогнозирование микроструктуры разнородных сварных соединений стали A508 и 304L с использованием сварочных материалов марки 309L и 310 по диаграмме Шеффлера (данные Котеки)

При использовании сварочного материала марки 310 линия связи с точкой химического состава основного металла попадает в область чистого аустенита. При смешивании основного металла с сварочным материалом образуется аустенитная структура с мартенситом при

отсутствии феррита. Поэтому такая микроструктура будет иметь склонность к кристаллизационным трещинам.

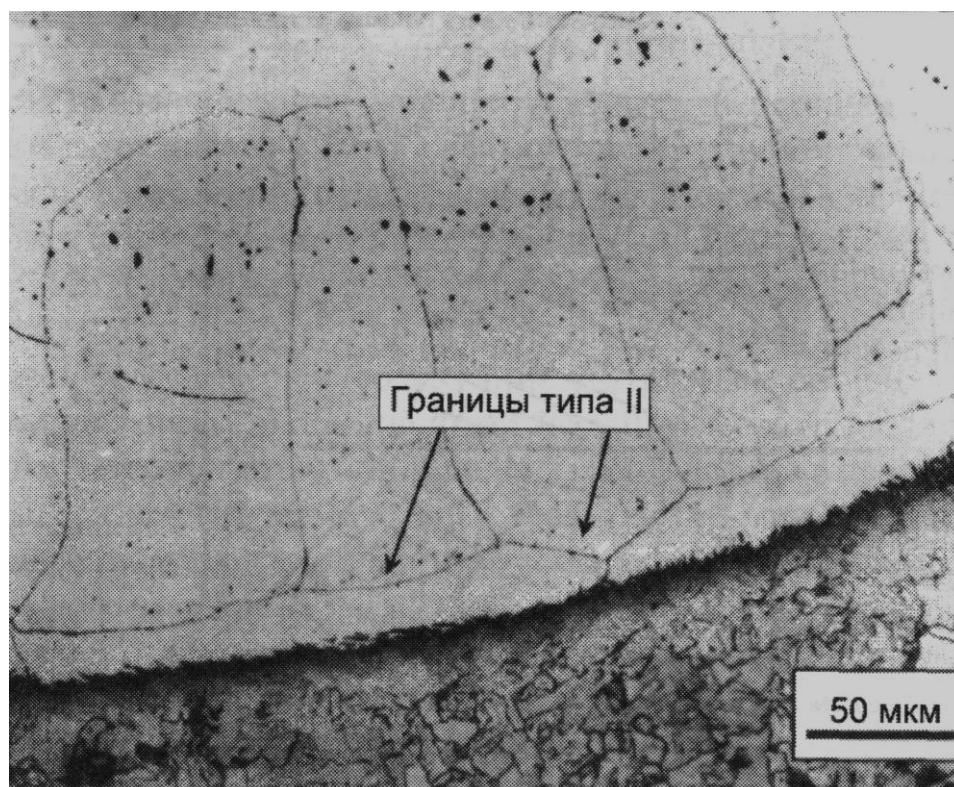


Рис. 1. Микроструктура границы сплавления стали А508 с наплавкой 309L.
Границы типа II – параллельны линии сплавления (данные Котеки)

Технология сварки трубных элементов из разнородных сталей

Сварка сталей разных структурных классов (перлитного с мартенситным и мартенситно-ферритным, перлитного с аустенитным, мартенситного и мартенситно-ферритного с аустенитным) производится чаще всего ручной дуговой и аргонодуговой сваркой. При этом сварные соединения сталей разных структурных классов часто встречаются в монтажной и ремонтной практике, например применительно к трубам поверхностей нагрева котлов, паропроводам пара и горячей воды.

Конструкцию сварного соединения следует выбирать по ГОСТ или РД в зависимости от способа сварки, диаметра и толщины элементов.

При сварке аустенитной стали с перлитной, мартенситной и мартенситно-ферритной соединяемые встык элементы должны иметь одинаковую толщину. Если соединяются элементы разной толщины, то должна быть произведена обработка более толстого элемента в соответствии с рекомендациями РД и ГОСТ.

Если стык элементов из сталей разного структурного класса сваривается на остающейся подкладке (подкладном кольце), то подкладку следует изготавливать из менее легированной свариваемой стали или из стали того же структурного класса, к которому относится металл корня шва. Марку присадочного материала следует выбирать по данным табл. 33.

Таблица 33

Присадочный материал для сварки элементов котлов и трубопроводов из разнородных сталей

Группа основных материалов по ПБ 03-164-97	Сталь свариваемых труб	Присадочный материал	
		электроды для ручной дуговой сварки	проволока для аргонодуговой сварки
Для элементов независимо от диаметра и толщины стенки			
1+1	Ст2, Ст3, Ст3Г, Ст4, 10, 08, 20 в	УОНИ-13/45, ТМУ-46, УОНИ-13/55, ЦУ-5,	Св-08Г2С, Св-08ГА-2, Св-08ГС

Группа основных материалов по ПБ 03-164-97	Сталь свариваемых труб	Присадочный материал	
		электроды для ручной дуговой сварки	проволока для аргонодуговой сварки
	сочетании с 15ГС, 16ГС, 17ГС, 10Г2С1, 09Г2С, 14ХГС, 14ГН, 16ГН	ТМУ-21У, ЦУ-6, ЦУ-7, ЦУ-8, АНО-11, ИТС-4С, ТМУ-50	
20	10, 20, 15ГС, 16ГС в сочетании с 12МХ, 15ХМ (и литье аналогичного состава)	УОНИ-13/55, ЦУ-5, ТМУ-21У, ЦУ-7, ТМУ-50, ЦУ-8, АНО-11, ИТС-4С, ЦУ-2ХМ, ТМЛ-1У, ЦЛ-38	Св-08Г2С, Св-08ГС, Св-08МХ*, Св-08ХМ*, Св-08ХМА-2, Св-08ХГСМА
20	10, 20, 15ГС, 16ГС в сочетании с 12Х2М1, 12Х1МФ, 15Х1М1Ф (и литье аналогичного состава)	УОНИ-13/55, ЦУ-5, ТМУ-21У, ЦУ-7, ЦУ-8, ТМУ-50, АНО-11, ИТС-4С, ЦУ-2ХМ, ТМЛ-1У, ЦЛ-38, ЦЛ-39, ТМЛ-3У, ЦЛ-20, ЦЛ-20М, ЦЛ-45	Св-08Г2С, Св-08ГС, Св-08МХ*, Св-08ХМ*, Св-08ХМА-2, Св-08ХГСМА, Св-08ХМФА*, Св-08ХМФА-2, Св-08ХГСМФА
4+4	12МХ, 15ХМ, 12Х2М1 в сочетании с 12Х1МФ, 15Х1М1Ф (и литье аналогичного состава)	ТМЛ-1У, ЦУ-2ХМ, ЦЛ-38, ЦЛ-39, ТМЛ-3У, ЦЛ-20, ЦЛ-20М, ЦЛ-45	Св-08МХ*, Св-08ХМ*, Св-08ХМА-2, Св-08ХГСМА, Св-08ХМФА*, Св-08ХМФА-2, Св-08ХГСМФА
Для элементов диаметром не более 100 мм и толщиной не более 10 мм			
4+4	12Х1МФ в сочетании с 12Х2МФСР	ТМЛ-1У, ЦУ-2ХМ, ЦЛ-38, ЦЛ-39, ТМЛ-3У, ЦЛ-20, ЦЛ-20М, ЦЛ-45	Св-08ХМ*, Св-08ХМА-2, Св-08ХГСМА, Св-08ХМФА*, Св-08ХМФА-2, Св-08ХГСМФА
21	12Х1МФ в сочетании с 10Х9МФБ (ДИ 82-Ш)	ЦЛ-39, ЦЛ-20, ТМЛ-3У	Св-08ХМФА*
5+9	10Х9МФБ (ДИ 82-Ш) в сочетании с 12Х18Н12Т	ЦТ-45	Св-03Х20Н45Г6М6Б-ВИ (ЭП953-ВИ)
22	12Х1МФ в сочетании с 12Х11В2МФ***	ЦЛ-39, ТМЛ-3У, ЦЛ-20, ЦЛ-20М, ЦЛ-45, ОЗЛ-6, ЗИО-8, ЦЛ-25/1, ЦЛ-25/2, ЭА-395/9, ЦТ-10, НИАТ-5	Св-08ХМФА*, Св-08ХМФА-2, Св-08ХГСМФА, Св-07Х25Н13,

Группа основных материалов по ПБ 03-164-97	Сталь свариваемых труб	Присадочный материал	
		электроды для ручной дуговой сварки	проволока для аргонодуговой сварки
			Св-10Х16Н25АМ6
23 и 24	20,12Х1МФ, 12Х2МФСР, 15Х1М1Ф, 12Х11В2МФ в сочетании с 12Х18Н10Т, 12Х18Н12Т	ЗИО-8, ОЗЛ-6, ЦЛ-25/1, ЦЛ-25/2, ЭА-395/9, ЦТ-10, НИАТ-5	Св-07Х25Н13, Св-10Х16Н25АМ6
23	12Х1МФ в сочетании с 10Х13Г12БС2Н2Д2 (ДИ 59)	ЭА-395/9, ЗИО-8, ЦЛ-25	Св-10Х16Н25АМ6, Св-07Х25Н13
9+9	12Х18Н12Т в сочетании с 10Х13Г12БС2Н2Д2 (ДИ 59)	ЦТ-15	Св-08Х19Н10Г2Б, Св-04Х20Н10Г2Б

Разнородные соединения из стали 10Х13Г12БС2Н2Д2 (ДИ 59) со сталями 12Х1МФ и 12Х18Н12Т выполняются комбинированной сваркой (корень — ручная аргонодуговая, остальное сечение — дуговая сварка покрытыми электродами).

Сварка сталей разных структурных классов с использованием аустенитного присадочного материала выполняется без предварительного подогрева стыка с минимальным тепловложением.

Сварные соединения сталей разных структурных классов (толщиной не более 10 мм), термической обработке не подвергаются (кроме стыков группы 21). Сварные соединения сталей одного структурного класса, но разного легирования, а также соединения группы 21 подвергаются термообработке.

2.9. Сварочные материалы для сварки высоколегированных сталей

Покрытые электроды

Покрытые электроды для дуговой сварки и наплавки высоколегированных сталей изготавливаются по ГОСТ 9466-75, ГОСТ 10051-75, ГОСТ 10052-75. В Европе штучные покрытые электроды изготавливаются по следующим стандартам: BS EN ISO 18275:2012, BS EN ISO 3580:2008, BS EN ISO 3581:2012.

ГОСТ 10052-75 распространяется на металлические покрытые электроды для ручной дуговой сварки коррозионностойких, жаропрочных и жаростойких высоколегированных сталей мартенситного, мартенситно-ферритного, ферритного, аустенитно-ферритного и аустенитного классов следующих типов: Э-12Х13, Э-06Х13Н, Э-10Х17Т, Э-12Х11НМФ, Э-12Х11НВМФ, Э-14Х11НВМФ, Э-10Х16Н4Б, Э-08Х24Н6ТАФМ, Э-04Х20Н9, Э-07Х20Н9, Э-02Х21Н10Г2, Э-06Х22Н9, Э-08Х16Н8М2, Э-08Х17Н8М2, Э-06Х19Н11Г2М2, Э-02Х20Н14Г2М2, Э-02Х19Н9Б, Э-08Х19Н10Г2Б, Э-08Х20Н9Г2Б, Э-10Х17Н13С4, Э-08Х19Н10Г2МБ, Э-09Х19Н10Г2М2Б, Э-08Х19Н9Ф2С2, Э-08Х19Н9Ф2Г2СМ, Э-09Х16Н8Г3М3Ф, Э-09Х19Н11Г3М2Ф, Э-07Х19Н11М3Г2Ф, Э-08Х24Н12Г3СТ, Э-10Х25Н13Г2, Э-12Х24Н14С2, Э-10Х25Н13Г2Б, Э-10Х28Н12Г2, Э-03Х15Н9АГ4, Э-10Х20Н9Г6С, Э-28Х24Н16Г6, Э-02Х19Н15Г4АМ3В2, Э-02Х19Н18Г5АМ3, Э-11Х15Н25М6АГ2, Э-09Х15Н25М6Г2Ф, Э-27Х15Н35В3Г2Б2Т, Э-04Х16Н35Г6М7Б, Э-06Х25Н40М7Г2, Э-08Н60Г7М7Т, Э-08Х25Н60М10Г2, Э-02Х20Н60М15В3, Э-04Х10Н60М24, Э-08Х14Н65М15В4Г2, Э-10Х20Н70Г2М2В, Э-10Х20Н70Г2М2Б2В.

ГОСТ 10051-75 устанавливает типы покрытых металлических электродов для ручной дуговой наплавки: Э-10Г2; Э-11Г3; Э-12Г4; Э-15Г5; Э-30Г2ХМ; Э-16Г2ХМ; Э-35Г6; Э-30В8Х3; Э-35Х12В3СФ; Э-90Х4М4ВФ; Э-37Х9С2; Э-70Х3СМТ; Э-24Х12; Э-20Х13; Э-35Х12Г2С2; Э-100Х12М; Э-120Х12Г2СФ; Э-10М9Н8К8Х2СФ; Э-65Х11Н3; Э-65Х25Г13Н3; Э-80В18Х4Ф; Э-90В10Х5Ф2; Э-105В6Х5М3Ф3; Э-10К15В7М5Х3СФ; Э-10К18В11М10Х3СФ;

Э-95Х7Г5С; Э-30Х5В2Г2СМ; Э-80Х4С; Э-320Х23С2ГРТ; Э-320Х25С2ГР;
 Э-350Х26Г2Р2СТ; Э-300Х28Н4С4; Э-225Х10Г10С; Э-110Х14В13Ф2;
 Э-175В8Х6СТ; Э-08Х17Н8С6Г; Э-09Х16Н9С5Г2М2ФТ; Э-09Х31Н8АМ2;
 Э-13Х16Н8М5С5Г4Б; Э-15Х15Н10С5М3Г; Э-15Х28Н10С3ГТ;
 Э-15Х28Н10С3М2ГТ; Э-200Х29Н6Г2; Э-190К62Х29В5С2.

Электроды покрытые поставляются во влагозащитной упаковке пачками весом 3–5 кг. На упаковке имеется этикетка, содержащая структурное обозначение данной партии электродов, рис. 19.

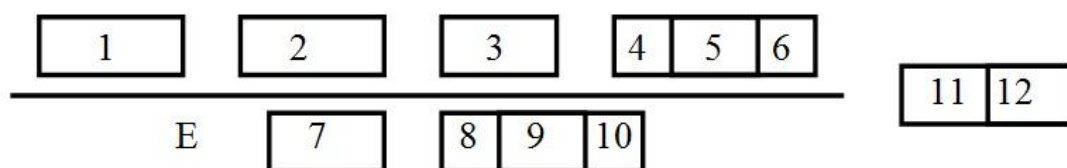


Рис. 19. Схема структуры обозначения покрытых электродов

Цифровые и буквенные шифры означают следующее:

- 1 – тип электрода: Э-08Х16Н8М2 и т. д.;
- 2 – марка электрода: ЦТ-26 и т. д.;
- 3 – диаметр электрода 2; 2,5; 3; 4; 5;
- 4 – назначение: для сварки углеродистых сталей (У), легированных сталей (Л), теплоустойчивых сталей (Т), высоколегированных сталей (В), наплавки (Н);
- 5 – толщина покрытия: тонкое (М), толстое (Д), среднее (С), особо толстое (Г);
- 6 – группа по качеству изготовления;
- 7 – группа индексов, характеризующих свойства наплавленного металла;
- 8 – вид покрытия: рутиловое (Р), основное (Б), кислое (А), целлюлозное (Ц), прочие (П);
- 9 – пространственное положение при сварке: все положения (1), кроме вертикального сверху вниз (2), кроме вертикального сверху вниз и потолочного (3), нижнее (4);

10 – вид и полярность тока: постоянный ток обратной полярности (0); переменный и постоянный ток обратной полярности (3, 6, 9); переменный и постоянный ток любой полярности (1, 4, 7); переменный и постоянный ток прямой полярности (2, 5, 8);

11, 12 – ГОСТ, ОСТ, ТУ на электроды.

При приемке электродов следует обращать внимание на наличие сертификата на данную партию электродов, сохранность упаковки и внешний вид электродов. Электроды хорошего качества должны быть сухими, иметь гладкую и ровную поверхность обмазки, зачищенный контактный торец. Количество электродов и их масса в пачке должны соответствовать этикетке.

Наиболее широко в промышленности используются качественные покрытые электроды для сварки металлоконструкций из углеродистых сталей и специальные электроды для сварки ответственного оборудования из легированных сталей, которые обеспечивают получение сварных швов с определенным химическим составом и механическими свойствами, табл. 34–37.

Таблица 34

Химический состав наплавленного металла электродов отечественного производства для сварки легированных сталей, %. Основа – Fe

Тип электрода	Марка	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V
Э-08Х16Н8М2	ЦТ-26	>0,08	0,3– 0,75	1,2– 2,3	16,5– 18,5	7,5–10	1,5– 2,3	–
Э-08Х16Н8М2	ЦТ- 26М	>0,05	0,3– 0,75	1,2– 2,3	16,5– 18,5	7,5–10	1,5– 2,3	–
Э-08Х19Н10Г2Б	ЦТ-15	0,05– 0,12	0,15– 0,7	1–2,5	18– 20,5	8,5– 10,5	–	–
Э-08Х19Н10Г2Б	ЦТ-15К	>0,06	0,2– 0,8	1,5– 2,2	17,5– 20,5	8,5– 10,5	–	–
Э-08Х20Н9Г2Б	ЦТ-15- 1	0,05– 0,12	0,15– 0,7	1,2– 2,2	19– 22	8–10,5	–	–
Э- 07Х19Н11М3Г2Ф	ЭА- 400/10У	>0,1	>0,6	1,1– 3,1	16,8– 19	9–12	2–3,5	0,3– 0,75
Э- 07Х19Н11М3Г2Ф	ЭА- 400/10Т	>0,1	>0,6	1,1– 3,1	16,8– 19	9–12	–	–
Э-10Х25Н13Г2	ОЗЛ-6	>0,1	0,3– 0,8	1,5– 2,5	24– 27	12,5– 13,5	–	–

Тип электрода	Марка	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V
Э-10Х25Н13Г2	ЗИО-8	>0,12	>1	1–2,7	23–27	11,5–14	–	–
Э-10Х25Н13Г2	ЦЛ-25/1	>0,12	>1	1–2,5	23–27	11,5–14	–	–
Э-10Х25Н13Г2	ЦЛ-25/2	>0,12	>1	1–2,5	23–27	11,5–14	–	–
Э-10Х25Н13Г2Б	ЦЛ-9	>0,12	0,4–1,2	1,2–2,5	21,5–26,5	11,5–14	4,5–7	–
Э-11Х15Н25М6АГ2	НИАТ-5	0,08–0,12	0,3–0,7	1–2	14,5–17	23,5–26,5	5–7	–
Э-11Х15Н25М6АГ2	ЦТ-10	0,08–0,14	0,3–0,7	1,5–2,3	13,5–17	23–27	4,5–7	–
Э-11Х15Н25М6АГ2	ЭА-395/9	0,08–0,12	0,35–0,7	1,2–2,8	13,5–17	23–27	–	–

Таблица 35

Механические свойства наплавленного металла некоторых электродов отечественного производства

Марка электрода	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость, КСУ, Дж/см ²
	не менее		
ЭА-400/10У, ЭА-400/10Т	540	25	90
ОЗЛ-6, ЗИО-8	540	25	90
ЦЛ-25/1	539	25	49
ЦЛ-25/2	539	25	88
ЦЛ-9	590	25	70
НИАТ-5	590	30	100
ЦТ-10	608	30	118
ЭА-395/9	610	30	120

Таблица 36

Химический состав наплавленного металла зарубежными электродами, %

Марка, страна	Соответствие типу по ГОСТ	C	Si	Mn	Cr	Mo	Другие элементы
Arosta 316 L Arosta 304 L (США)	03Х18Н12М3	0,025	0,8	0,8	18	2,7	Ni–11,5
	03Х20Н10	0,025	0,8	1,0	20	–	Ni–10

Марка, страна	Соответствие типу по ГОСТ	C	Si	Mn	Cr	Mo	Другие элементы
Fox EAS 4 M	03X19H12M3	<0,04	0,4	1,3	18,8	2,7	Ni–11,5
Fox CN23/12MoA	02X23H12M3	0,02	0,7	0,8	23	2,7	Ni–12,5
Fox CN 20/25M (Австрия)	02X20H25Г2 M7	<0,04	0,4	2,1	20	6,5	Ni–25; Cu– 1,4
Z-310 (Израиль)	13X25H20Г2	0,13	0,4	2,1	25	–	Ni–20

Таблица 37

Свойства наплавленного металла зарубежными электродами

Марка, страна	Режим термообработки	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость, КСV Дж/см ² при 20°С
Arosta 316 L Arosta 304 L (США)	Без термообработки	>490 >520	>30 >35	87,5 87,5
Fox EAS 4 M Fox CN23/12MoA Fox CN 20/25M (Австрия)	Без термообработки	540–690 670–810 600–700	>35 >25 >30	>59 >59 >59
Z-310 (Израиль)	Без термообработки	580	30	100

При проведении сварочных работ следует правильно рассчитывать расход электродов, коэффициент наплавки, что зависит от марки и типа покрытого электрода. Ориентировочные нормы расхода на сварку труб электродов с покрытием основного типа, приведены в табл. 38.

Таблица 38

Нормы расхода сварочных электродов на 1 стык труб с разделкой кромок:
 скос кромок 30° , зазор 1,5...2 мм, притупление 1 мм

Типоразмер трубы	Норма расхода электродов, кг	Типоразмер трубы	Норма расхода электродов, кг
32×3	0,021	219×8	0,929
32×3,5	0,037	219×9	1,255
32×4	0,042	273×8	1,159
32×5	0,052	273×9	1,571
57×3	0,057	273×10	1,774
57×3,5	0,067	273×11	1,968
60×3	0,058	325×6	0,549
60×3,5	0,06	325×7	0,662
60×4	0,068	325×8	0,777
76×3	0,076	325×9	1,142
76×3,5	0,088	325×10	1,269
76×4	0,108	426×6	0,72
83×3,5	0,121	426×7	0,869
83×4	0,118	426×11	1,963
89×3	0,085	530×8	2,263
89×3,5	0,12	530×9	2,6
89×4	0,128	630×8	2,22
89×4,5	0,135	630×9	2,37
108×3	0,108	630×12	3,16
108×3,5	0,121	720×8	2,25
108×4	0,156	720×9	2,53
108×4,5	0,159	720×10	2,81
108×5	0,166	820×8	2,56
108×6	0,209	820×9	3,1
159×4	0,203	920×9	3,5
159×4,5	0,228	920×10	3,61
159×5	0,254	1020×9	3,84
159×6	0,305	1020×10	3,99
219×6	0,674	1220×11	5,62

Для каждой марки электродов существует определенный коэффициент наплавки. Вначале определяют массу наплавленного металла, которая рассчитывается для каждого сварного изделия, в зависимости от конструкции сварного соединения. Затем определяют общий расход электродов с учетом коэффициента наплавки.

При расчете расхода электродов на сварку металлоконструкций ориентировочно можно пользоваться данными таблицы 8, принимая длину сварного шва металлоконструкции равной длине окружности трубы с одинаковой толщиной стенки.

Электроды с покрытием для сварки жаропрочных сталей регламентируются BS EN ISO 3580:2008 – Welding consumables. Covered electrodes for manual metal arc welding of creep-resisting steels. Classification, согласно которого структура обозначения электрода состоит из 6 кодов:

1. Изделие и/или метод сварки (обозначенные буквой E);
2. Химический состав наплавленного металла;
3. Тип покрытия – в электродах этого типа присутствуют два вида покрытий: рутиловое – обозначаемое буквой R и основное обозначаемое буквой B;
4. Коэффициент перехода и вид сварочного тока;
5. Положение сварки;
6. Содержание водорода в наплавленном металле.

Например: E CrMo1 B 3 4 H5: электрод с покрытием для дуговой ручной сварки по EN 1599, наплавленный металл содержит 1,1 % Cr и 0,6 % Mo (CrMo1), с основным покрытием (B). Может применяться для сварки постоянным током и имеет коэффициент перехода 120 % (3). Для исполнения стыковых и угловых швов в нижнем положении (4). Содержание водорода в наплавленном металле не превышает 5 мл/100 г металла (H5).

Электроды с покрытием для сварки нержавеющей и жаростойких сталей регламентируются BS EN ISO 3581:2012 – Welding consumables. Covered electrodes for manual metal arc welding of stainless and heat-resisting steels. Classification, согласно которого структура обозначения электрода состоит из 5 кодов:

1. Изделие и/или метод сварки обозначены буквой Е (электрод с покрытием);
2. Алфавитно-цифровой символ, определяющий химический состав наплавленного металла и прочностные свойства;
3. Тип покрытия – в случае электродов для ручной сварки высоколегированных сталей применяются два типа покрытия с обозначениями: R – рутиловый, В – основной;
4. Положение сварки;
5. Тип сварочного тока и коэффициент перехода наплавленного металла.

Например: Е 19 12 3 L R 1 2: Е – электрод с покрытием; 19 12 3 L – химический состав наплавленного металла, согласно таблице с химическим составом: С – 0,04 %; Si – 1,2 %; Mn – 2,0 %; Cr – 17,0...20,0 %; Ni – 10,0...13,0 %; Mo – 2,5...3,0 %; R – рутиловое покрытие; 1 – все положения сварки; 2 – сварка постоянным током с коэффициентом перехода электрода менее 105 %.

Вольфрамовые неплавящиеся электроды

Электроды вольфрамовые по ГОСТ 23949-80 выпускаются следующих марок: ЭВЧ, ЭВИ-1, ЭВИ-2, ЭВИ-3, ЭВТ-15, ЭВЛ диаметром 0,5; 1; 1,6; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6; 8; 10 мм длиной 75; 150; 200; 300 мм. Электроды получают способами порошковой металлургии. По внешнему виду электроды ЭВЧ светлого серого цвета, ЭВИ светло-серебристого цвета, ЭВЛ черного или темно-зеленого цвета. Наибольшей стойкостью и стабильность горения дуги обладают электроды ЭВЛ, ЭВИ, содержащие в составе 1,1...1,4 % лантана или 1,5...3,5 % иттрия.

Электроды ЭВТ-15, содержащие в своем составе 1,5...2 % радиоактивного тория, в настоящее время отечественной промышленностью не выпускаются. Однако импортные электроды с торием производятся, имеют серебристый цвет и маркируются красной краской.

Наиболее широкое применение для сварки имеют вольфрамовые электроды диаметрами 1,0...6,0 мм, с высокой механической прочностью и сравнительно небольшим электрическим сопротивлением. Температура плавления вольфрама 3377 °С, температура кипения 4700 °С.

Вольфрамовые стержни изготавливают из порошка (чистотой 99,7 %), который прессуют, спекают и проковывают, в результате чего отдельные его частицы свариваются. Заготовки подвергают волочению для получения стержней необходимых диаметров.

Вольфрамовые электроды изготавливают из чистого вольфрама и с присадками окислов лантана, иттрия или тория, а также металлического тантала по ГОСТ 23949-80 в виде прутков и проволоки различного диаметра и длины.

ЭВЧ – электрод вольфрамовый чистый, диаметром 0,5; 1,0; 1,6; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0 мм, не маркируется.

ЭВЛ – электрод вольфрамовый с добавками оксида лантана La_2O_3 1,1...1,4 %, диаметром 1,0; 1,6; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0 мм, цвет маркировки чёрный.

ЭВИ-1 – электрод вольфрамовый с добавками оксида иттрия Y_2O_3 1,5...2,3 %, диаметром 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0 мм, цвет маркировки – синий.

ЭВИ-2 – электрод вольфрамовый с добавками оксида иттрия Y_2O_3 2...3 % и 0,01 % тантала, диаметром 2,0; 3,0; 4,0 мм, цвет маркировки – фиолетовый.

ЭВИ-3 – электрод вольфрамовый с добавками оксида иттрия Y_2O_3 2,5...3,5 % и 0,01 % тантала, диаметром 5,0; 6,0; 8,0; 10,0 мм, цвет маркировки зелёный.

ЭВТ-15 – электрод вольфрамовый с добавками диоксида тория Th_2O 1,5...2,0 %, диаметром 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0 мм, цвет маркировки красный.

В Европе вольфрамовые электроды выпускаются по BS EN ISO 6848:2004 – Arc welding and cutting. Nonconsumable tungsten electrodes. По стандарту выпускаются электроды из чистого вольфрама, с присадками церия, лантана, тория и циркония, диаметром 0,25...10 мм и длиной 50...600 мм, табл. 39.

Таблица 39

Химический состав вольфрамовых электродов по BS EN ISO 6848:2004

Маркировка электрода	Легирование	Содержание легирования, %	Содержание примесей, max. %	Цвет маркировки торца
WP	–	–	0,5	зеленый
WCe 20	CeO ₂	1,8–2,2	0,5	серый
WLa 10	La ₂ O ₃	0,8–1,2	0,5	черный
WLa 15	La ₂ O ₃	1,3–1,7	0,5	золотой
WLa 20	La ₂ O ₃	1,8–2,2	0,5	синий
WTh 10	ThO ₂	0,8–1,2	0,5	желтый
WTh 20	ThO ₂	1,7–2,2	0,5	красный
WTh 30	ThO ₂	2,8–3,2	0,5	фиолетовый
WZr 3	ZrO ₂	0,15–0,5	0,5	коричневый
WZr 8	ZrO ₂	0,7–0,9	0,5	белый

В табл. 40 указан примерный диапазон сварочного тока в зависимости от полярности тока и диаметра электрода по BS EN ISO 6848:2004.

Таблица 40

Рекомендуемый ток для вольфрамовых электродов по BS EN ISO 6848:2004

Диаметр электрода, мм	Постоянный ток, А	
	Прямая полярность	
	Чистый вольфрам	Вольфрам с оксидами
1,5	60–150	60–150
2	75–180	100–200
2,5	130–230	170–250
3	150–300	210–310
4	275–450	350–480
5	400–625	500–675
8	–	–

Выбор диаметра вольфрамового электрода определяется в основном размером свариваемых деталей, силой сварочного тока, родом тока и полярностью, табл. 41.

Выбор диаметра вольфрамового электрода

Газ	Род тока	Максимальная сила тока, А, при диаметре электрода, мм:				
		1–2	3	4	5	6
Аргон	прямая полярность	65–150	140–280	250–340	300–400	350–450
Гелий	прямая полярность	50–110	100–200	200–300	250–350	300–450

Следует отметить, что при сварке вольфрамовым электродом важно обеспечить оптимальный тепловой режим работы электрода. В противном случае электрод перегревается и расплавляется. Поэтому сварка осуществляется преимущественно на прямой полярности, когда электрод является катодом.

При аргонодуговой сварке важна заточка рабочего торца электрода. При сварке на постоянном токе прямой полярности рабочий торец следует затачивать с углом 30...45°. Для определения расхода вольфрамовых электродов можно воспользоваться данными таблицы 42.

Однако необходимо подчеркнуть, что эти данные приблизительны. Расход электродов зависит от множества причин, в частности от степени автоматизации – ручная сварка или автоматическая, способа возбуждения дуги, конструкции сварочной горелки, вида свариваемого материала, качества изготовления электродов, качества защитного газа, способа заточки электрода и др.

Хорошей стойкостью обладают электроды, заточенные алмазным кругом, из шлифованных прутков иттрированного вольфрама.

Нормы расхода вольфрамовых электродов при ручной сварке

Диаметр электрода, мм	Номинальный ток, А	Удельный расход электродов P , г/ч, из:		
		чистого вольфрама	Лантанированного вольфрама	Иттрированного вольфрама
1	40	0,06	0,09	0,09
2	60	0,12	0,14	0,15
3	100	0,2	0,22	0,24
4	150	0,35	0,38	0,4
5	200	0,5	0,53	0,55
6	300	0,63	0,66	0,68
8	500	0,7	0,75	0,77
10	600	0,75	0,8	0,83

Расход P , (грамм на погонный метр шва) определяется как:

$$P = 2,2pn/v,$$

где: p – удельный расход, г/ч; v – скорость сварки, м/ч; n – число проходов.

Сварочная проволока и присадочные прутки

Данные сварочной литературы свидетельствуют, что в мире сокращается выпуск сварочных покрытых электродов и увеличивается доля сплошных и порошковых проволок. Это объясняется повышением качества продукции и производительности сварочных процессов за счет широкого внедрения механизированной и автоматической сварки.

Объем ручной сварки в развитых странах постоянно уменьшается. Это обусловлено экономическими причинами – сварочный автомат способен заменить одновременный труд нескольких рабочих-сварщиков. Кроме того, применение автоматов и роботов позволяет существенно улучшить санитарно-гигиенические условия рабочих, сократить время их нахождения в опасной и вредной зоне сварочных работ.

В качестве сварочных присадочных и электродных проволок, прутков применяют проволоки, которые выпускаются согласно ГОСТ 2246-70 «Проволока стальная сварочная».

ГОСТ 2246-70 предусматривает 77 марок сварочных проволок диаметром 0,3...12 мм. Пример обозначения проволоки: 1,2 Св-08Г2С-О ГОСТ 2246-70: стальная сварочная проволока диаметром 1,6 мм с содержанием углерода около 0,08 %, марганца около 2 %, кремния до 1 % с пониженным содержанием серы и фосфора, с омедненной поверхностью.

В марке проволоки может указываться легирующие элементы, которые обозначаются буквами: Б – ниобий; Д – медь; С – кремний; Х – хром; А – азот; В – вольфрам; М – молибден; Т – титан; Ц – цирконий; К – кобальт; Г – марганец; Н – никель; Ф – ванадий; Ю – алюминий; Е – селен.

Проволока сварочная стальная выпускается согласно ГОСТ 2246-70 двух видов: обыкновенная стальная и с омедненной поверхностью. Проволоку выпускают диаметром: 1; 1,2; 1,4; 1,5; 1,6; 2; 2,5; 3 мм в мотках массой 10, 15, 20, 25, 30, 40 кг из низкоуглеродистой, низколегированной и высоколегированной стали, табл. 43.

Таблица 43

Химический состав сварочной проволоки по ГОСТ 2246-70, %

Марка проволоки	С	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	S	P
							не более	
Св-12Х11НМФ	0,08–0,15	0,35–0,65	0,25–0,55	10,5–12,0	0,6–0,9	0,6–0,9	0,025	0,03
Св-10Х11НВМФ	0,08–0,13	0,35–0,65	0,3–0,6	10,5–12,0	0,8–1,1	1,0–1,3	0,025	0,03
Св-01Х19Н9	≤0,03	1–2	0,5–1	18–20	8–10	–	0,015	0,025
Св-04Х19Н9	≤0,06	1–2	0,5–1	18–20	8–10	–	0,018	0,025
Св-06Х19Н9Т	≤0,08	1–2	0,4–1	18–20	8–10	–	0,015	0,03
Св-04Х19Н11М3	≤0,06	1–2	≤0,06	18–20	10–12	2–3	0,018	0,025
Св-08Х19Н10Г2Б	0,05–0,1	1,8–2,2	0,2–0,45	18,5–20,5	9,5–10,5	–	0,02	0,03

Марка проволоки	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	S	P
							не более	
СВ-04Х20Н10Г2Б	≤0,04	1,8–2,2	0,1–0,3	18,5–20,5	9,0–10,5	≤0,25	0,018	0,025
СВ-07Х25Н13	≤0,09	1–2	0,5–1	23–26	12–14	–	0,018	0,025
СВ-10Х16Н25АМ 6	0,08–0,12	1–2	≤0,06	15–17	24–27	5,5–7,0	0,018	0,025

Поверхность проволоки должна быть чистой и гладкой без трещин, расслоений, плен, закатов, окалины, ржавчины, смазок и масла. Допускаются риски, царапины, рябизна и отдельные вмятины. Высоколегированная проволока поставляется со светлой, светло-матовой или серой поверхностью без следов смазки. Каждый моток проволоки должен быть обернут парафинированной бумагой, затем полимерной пленкой и тканью. Поверх упаковки закрепляют металлический ярлык с указанием наименования изготовителя, обозначения проволоки, номера партии и клейма ОТК.

Расход сварочной проволоки определяется по формуле:

$$G = 1,3F_n \rho L,$$

где F_n – площадь поперечного сечения наплавленного металла, см^2 ; ρ – плотность металла г/см^3 ; L – длина шва, см ; 1,3 – коэффициент учитывающий потери сварочной проволоки.

В Европе проволоки и прутки выпускают по следующим стандартам: BS EN ISO 21952:2007 – Welding consumables. Wire electrodes, wires, rods and deposits for gas-shielded arc welding of creep-resisting steel. Classification;

BS EN ISO 14343:2007 – Welding consumables. Wire electrodes, strip electrodes, wires and rods for fusion welding of stainless and heat resisting steels. Classification; BS EN 756:2004 – Welding consumables. Solid wires, solid wire-flux and tubular cored electrode-flux combinations for submerged arc welding of non alloy and fine grain steels. Classification; BS EN 12536:2000 – Welding consumables. Rods for gas welding of non alloy and creep-resisting steels. Classification. Standard by British-Adopted European Standard, 06/15/2000; BS EN ISO 636:2008 – Welding consumables. Rods,

wires and deposits for tungsten inert gas welding of non-alloy and fine-grain steels. Classification.

Проволока для MIG/MAG, TIG-сварки нержавеющей и жаростойких сталей по BS EN ISO 14343:2007 обозначается 2 кодами:

1. Изделие / метод сварки;
2. Химический состав материала.

Например: G 20 10 3 / S 20 10 3: Электродная проволока для дуговой сварки в среде защитных газов, возможно применение под флюсом с химическим составом согласно таблице. Другой пример: W 25 7 2 L: Пруток для сварки вольфрамовым электродом в среде защитных газов с химическим составом согласно нормам.

Активирующие флюсы для сварки высоколегированных сталей

Активирующие флюсы представляют собой газообразные или кристаллические вещества, преимущественно состоящие из галогенидных солей. Традиционно флюсы в виде порошков и паст наносили на свариваемые кромки деталей или в газообразном состоянии вводили в защитный газ при аргонодуговой сварке вольфрамовым электродом. Введение активирующих флюсов позволяет увеличить глубину проплавления металла, уменьшить ширину сварного шва и улучшить механические характеристики наплавленного металла.

Типичные составы активирующих флюсов для сварки сталей и цветных металлов, созданные за последние 30 лет и способах сварки с их применением представлены в табл. 44.

Таблица 44

Характеристика твердых активирующих флюсов и способов сварки с их применением

№ п/п	Назначение и состав флюса (способа)	Цель и особенности применения, [источник]
1.	Для сварки нержавеющей и высокопрочных сталей вольфрамовым электродом сплавов, вес, %: Li_3AlF_6 – 20...30; TiO_2 – 20...30; SiO_2 или GeO_2 или TeO_2 – 40...60	Для увеличения проплавляющей способности дуги в 1,5...2,5 раза

№ п/п	Назначение и состав флюса (способа)	Цель и особенности применения, [источник]
2.	Для сварки высоколегированных нержавеющей сталей вольфрамовым электродом, вес, %: $\text{SiO}_2 - 0,5...3$; $\text{TiO}_2 - 19...22$; $\text{Cr}_2\text{O}_3 - 6...8$; $\text{Al}_2\text{O}_3 - 6...8$; $\text{NaF} - 31...39,5$; $\text{LiF} - 13...18$; $\text{V}_2\text{O}_4 - 4...7$; $\text{La}_2\text{O}_3 - 7...7,7$; Лак – $5...10$	Увеличение проплавления и качества шва. Смешивают с лаком, наносят на внешнюю сторону деталей кистью шириной $0,6...0,7$ диаметра активного пятна по каждую сторону
3.	Для сварки нержавеющей сталей вольфрамовым электродом, вес, %: $\text{TiO}_2 - 17...30$; $\text{Cr}_2\text{O}_3 - 10...18$; $\text{NaAlF}_6 - 40...70$; $\text{V}_2\text{O}_3 - 3...12$	Для увеличения проплавления на $60...70\%$
4.	Для сварки конструкционных и нержавеющей сталей в среде инертного газа, вес, %: $\text{Li}_3\text{AlF}_6 - 40...60$; $\text{TiO} - 40...60$	Для уменьшения шлаковых включений, увеличения глубины проплавления. Дисперсия порошка менее $70\ \mu\text{м}$
5.	Для сварки низкоуглеродистых и мартенситных сталей в среде инертного газа вольфрамовым электродом, вес, %: $\text{Li}_3\text{AlF}_6 - 35...50$; $\text{TiO}_2 - 40...60$; $\text{Na}_3\text{AlF}_6 - 20...30$	Для улучшения глубины проплавления на 120% , формирования шва и отделимости шлака. Дисперсия порошка менее $70\ \mu\text{м}$. Наносят кистью в виде пасты – растворе в этиловом спирте при соотношении $1:3$
6.	Для сварки нержавеющей сталей в среде инертных газов неплавящимся электродом, вес, %: $\text{LiF} - 10...27,5$; $\text{NaF} - 27,5...50$; $\text{TiO}_2 - 15...25$; $\text{Cr}_2\text{O}_3 - 5...15$; $\text{NiO} - 2...20$; $\text{V}_2\text{O}_5 - 3...10$	Для увеличения глубины проплавления на $70...80\%$, улучшения шлакоотделения. Наносят кистью слоем шириной $2...10\ \text{мм}$ и толщиной $0,1...0,3\ \text{мм}$. Используют спирт, парафин, стеарин
7.	Для сварки нержавеющей сталей вольфрамовым электродом, вес, %: $\text{MgTiF}_6 - 40...70$; $\text{TiO}_2 - 20...30$; $\text{V}_2\text{O}_5 - 10...40$	Для увеличения глубины проплавления на $60...100\%$, улучшения шлакоотделения. Наносят кистью слоем шириной $2...10\ \text{мм}$ и толщиной $0,1...0,3\ \text{мм}$. Используют спирт, парафин, стеарин
8.	Для сварки нержавеющей сталей мартенситного класса вольфрамовым электродом, вес, %: $\text{Li}_3\text{AlF}_6 - 40...50$; $\text{TiO}_2 - 30...40$; Si_3N_4 или $\text{HfO}_2 - 10...20$	Для увеличения проплавления, шлакоотделимости

№ п/п	Назначение и состав флюса (способа)	Цель и особенности применения, [источник]
9.	Для сварки толстолистовых сталей, вес, %: MgF_2 – 20...30; ZrO_2 – 70...80	Для увеличения проплавления на 50...100 %, улучшения качества шва. Дисперсия частиц менее 50 мкм. Наносят в виде спиртовой суспензии 1:1 толщиной 0,05...0,1 мм
10.	Для аргонодуговой сварки неплавящимся электродом никельсодержащих сталей, вес, %: CaF_2 – 60...65; MgF_2 – 38...42; Na_3AlF_6 – 20...30	Для улучшения качества и формирования шва, увеличения проплавления. Наносят в виде спиртовой суспензии на внешнюю сторону толщиной 0,06...0,08 мм
11.	Для сварки нержавеющей сталей вольфрамовым электродом, вес, %: LiF – 80...90; CaF_2 – 10...20	Увеличение проплавления на 30 %. Преждевременно испаряется. [А.с. СССР № 186842]
12.	Для сварки нержавеющей сталей вольфрамовым электродом, вес, %: NaF – 6,4; SiO_2 – 57,3; TiO_2 – 13,6; Cr_2O_3 – 9,1; Ti – 13,6; стеарин – 20,5	Увеличение проплавления на 60 %. Загрязняет окислами, образует поры. [А.с. СССР № 349538]
13.	Для сварки нержавеющей сталей вольфрамовым электродом, вес, %: Cr_2O_3 – 10...90; TiO_2 – 10...90	Увеличение проплавления на 60...70 %. Загрязняет окислами. [А.с. СССР № 493321]
14.	Для сварки конструкционных и нержавеющей сталей вольфрамовым электродом, вес, %: TiO_2 – 12...18; тугоплавкий металл: Mo , W , Nb , Cr , Ta – 20...22; SiO_2 – 60...68	Для увеличения глубины проплавления. [А.с. СССР № 488675]
15.	Для сварки конструкционных и нержавеющей сталей вольфрамовым электродом, вес, %: $LiTiF_6$ – 17,5; $LiBF_6$ – 82,5	Для увеличения глубины проплавления. [А.с. СССР № 697286]
16.	Для сварки жаропрочных и никелевых сплавов, вес, %: Li_3AlF_6 – 30...35; TiO_2 – 65...70	Образует шлаковые включения. [А.с. СССР № 499997]
17.	Для сварки жаропрочных и никелевых сплавов, вес, %: Li_3AlF_6 – 35...50; TiO_2 – 40...60; Na_3SiF_6 – 5...15	Для увеличения глубины проплавления на 100 %. Образует шлаковые включения. [А.с. СССР № 484960]

№ п/п	Назначение и состав флюса (способа)	Цель и особенности применения, [источник]
18.	Для сварки нержавеющей сталей вольфрамовым электродом, вес, %: CaF_2 – 28...32; MgF_2 – 38...42; LiCl – 5...7; CaCl_2 – 23...25	Для увеличения проплавления. Образует шлаковые включения, гигроскопичен. [А.с. СССР № 349535]
19.	Для сварки неплавящимся электродом никеля, хрома и их сплавов в среде гелия под высоким давлением, вес, %: ZrO_2 – 33,5...35; BaF_2 – 45...49; MgF_2 – 10...15; фторид гадолиния – 4...6	Для снижения напряжения зажигания дуги и улучшения качества шва при давлении гелия 20...100 атм. Наносят в виде спиртового шликера 1:1 толщиной 0,05...0,1 мм
20.	Для электродуговой сварки нержавеющей сталей в среде защитных газов, вес, %: ZrSiO_4 – 5...8; Mn – 3...4; AlF_3 – остальное	Для улучшения шлакоотделимости и глубины проплавления
21.	Для ручной и автоматической сварки теплоустойчивых и жаропрочных сталей в инертном газе, вес, %: Li_3AlF_6 – 17...25; TiO_2 – 17...25; (SiO_2 или GeO_2 или TeO_2) – 35...40; CaCl_2 – 20...30	Для увеличения проплавления и стабильности формирования шва. Наносят в виде 50 мкм шликера в соотношении 1:1 толщиной 0,1 мм, шириной 10 мм на каждую сторону
22.	Для ручной и автоматической сварки высокопрочных, теплоустойчивых и жаропрочных сталей в инертном газе, вес, %: Li_3AlF_6 – 20...30; TiO_2 – 20...30; Al_2O_3 – 10...30; CaCl_2 – 20...30	Для увеличения проплавления и стабильности формирования шва. Обеспечивает высокую адгезию и низкую электропроводимость шлака. Наносят в виде 50 мкм шликера 1:1 толщиной 0,1 мм, шириной 10 мм на сторону

Активирующие флюсы предназначены преимущественно для WIG-сварки и применяются в виде шликеров с нанесением на внешнюю сторону деталей. Основная часть флюсов для сварки сталей имеет солеоксидную систему и состоит из 30...60 % галогенидных солей и 40...70 % оксидов. В качестве солей применяют комплексные фториды Na, Mg, Ti, Li, реже фториды щелочных и щелочноземельных металлов с большой энергией диссоциации. В качестве оксидов применяют тугоплавкие оксиды Ti, Si, V, Ni, Cr при содержании 8...90 %,

обладающие низкой электропроводимостью в жидком состоянии. Некоторые флюсы содержат нитриды, бромиды, хлориды, порошки Zr, Ti.

Также для улучшения качества при аргонодуговой сварке используют примеси газообразных флюсов, табл. 45.

Таблица 45

Режимы сварки и свойства сварных соединений сталей

Защитная среда	Режим сварки			Механические свойства шва	
	I_{CB}, A	U_d, B	$V_{CB}, M/час$	σ_B, MPa	$\psi, \%$
Сталь 1X18H10T толщина 2 мм					
Ar без флюса	90	9,2	16	(625...660)/ 642,5	–
Ar +0,7 % SF ₆	70	10,2	16	(600...630)/ 615	–
Ar +1,5 % хладон-12	70	10,5	16	(615...625)/ 620	–
Сталь 1X18H10T толщина 10 мм					
Ar без флюса	57,6	9,0	10	(636...657)/ 646,5	57,6
Ar +0,6 % SF ₆	60,6	10,8	10	(619...637)/ 628	60,6
Ar +1,2 % хладон-12	56,6	13,3	10	(640...644)/ 642	56,6

Библиографический список

1. Акулов А.И. Технология и оборудование сварки плавлением/ А. И. Акулов, Г. А. Бельчук, В. П. Демянцевич – М.: Машиностроение., 1977. – 432 с.
2. ГОСТ 5264-80 Ручная дуговая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры.
3. ГОСТ 14771-76 Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры.
4. ГОСТ 23518-79 Дуговая сварка в защитных газах. Соединения сварные под острыми и тупыми углами. Основные типы, конструктивные элементы и размеры.
5. ГОСТ 16037-80 Соединения сварные стальных трубопроводов. Основные типы, конструктивные элементы и размеры.
6. ГОСТ 8713-79 Сварка под флюсом. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры.
7. ГОСТ 11533-75 Автоматическая и полуавтоматическая дуговая сварка под флюсом. Соединения сварные под острыми и тупыми углами. Основные типы, конструктивные элементы и размеры.
8. Гуляев А.П. Металловедение. М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
9. Земзин В.Н. Жаропрочность сварных соединений/ В. Н. Земзин. – М.: Машиностроение, 1972. – 272 с.
10. Кархин В.А. Тепловые процессы при сварке // В.А. Кархин – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2013. – 656 с.
11. Козлов Р. А. Сварка теплоустойчивых сталей/Р. А. Козлов. – М-Л.: Машиностроение, 1986. – 160 с.
12. Липпольд Д., Котеки Д. Металлургия сварки и свариваемость нержавеющей сталей: [пер. с англ.: Б.В. Федотов] / под ред. Н.А. Соснина, А.М. Левченко. – СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2011. – 467 с.
13. Любавский К.В. Металлургия сварки сталей плавлением. – М.: Знание. – 1961. – 151 с.
14. Макаров Э.Л. Холодные трещины/ Э.Л. Макаров. – М.: Машиностроение, 1981. – 248 с.

15. Медовар Б. И. Сварка жаропрочных аустенитных сталей и сплавов/ Б. И. Медовар. – М.: Машиностроение, 1966. – 429 с.
16. Паршин С.Г. Наноструктурированные и активирующие материалы для дуговой сварки. Монография / С.Г. Паршин. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 624 с.
17. Петров Г.Л. Сварка и резка нержавеющей сталей/ Г.Л. Петров. – Л.: Судостроение, 1970. – 284 с.
18. Петров Г.Л. Сварочные материалы/ Г. Л. Петров. – М.: Машиностроение, 1972. – 279 с.
19. Петров Г.Л., Тумарев А.С. Теория сварочных процессов. М.: Высшая школа, 1977. – 392 с.
20. Потапьевский А.Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом/ А. Г. Потапьевский.– М.: Машиностроение, 1974.–240 с.
21. Походня И. К. Металлургия дуговой сварки. Процессы в дуге и плавление электродов/ И. К. Походня, В. Н. Горпенюк, С. С. Миличенко и др./ Под ред. И. К. Походни; АН УССР. Институт электросварки им. Е. О. Патона.– Киев.: Наукова думка, 1990. – 224 с.
22. Прохоров Н. Н. Физические процессы в металлах при сварке. Т. 1./ Н. Н. Прохоров. – М.: Metallurgy, 1968. – 696 с.
23. Прохоров Н.Н. Горячие трещины при сварке/ Н.Н. Прохоров. – М.: Машгиз, 1954. – 220 с.
24. Сварка в машиностроении. Справочник. Т.1./ Под ред. Н. А. Ольшанского.– М.: Машиностроение, 1978, – 504 с.
25. Сварка в машиностроении. Справочник. Т.4./ Под ред. Ю. Н. Зорина.– М.: Машиностроение, 1979.– 512 с.
26. Сварка и свариваемые материалы/ Справочник. Т. 1/ Под ред. В.Н. Волченко. –М.: Metallurgy, 1991. – 526 с.
27. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением/ Под ред. Б. Е. Патона.– М.: Машиностроение, 1974.– 768 с.
28. Шебеко Л.П. Оборудование и технология автоматической и полуавтоматической сварки/ Л. П. Шебеко.– М.: Высшая школа, 1986. – 280 с.
29. Шоршоров М. Х. Фазовые превращения и изменения свойств стали при сварке/ М. Х. Шоршоров, В. В. Белов. – М.: Наука, 1972. – 220 с.

Учебное пособие

Паршин Сергей Георгиевич

**ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ.
СВАРКА ПЛАВЛЕНИЕМ.
ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ
ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ**

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
ОК 005-93, т. 2; 95 3004 – научная и производственная литература

Подписано в печать 21.01.2015. Формат 60х90/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 40,5. Тираж 50. Заказ 106576

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного авторами, в типографии

Издательства Политехнического университета.
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
Тел.: (812) 550-40-14
Тел./факс: (812) 297-57-76