

Перемешивание присадочного материала и основного металла при сварке плакированных материалов

Рекомендации и примеры расчетов.

А. По отношению к трем областям применения

- Сварные соединения аустенитных сталей с ферритными
- Наплавка плакирующих покрытий
- Сварка плакированных деталей

эффект разбавления вызывает ряд схожих между собой проблем, которые приводят к необходимости установления критериев выбора сварочных материалов, способов сварки и последовательности действий.

В. Основные принципы

1. Глубина проплавления и разбавление

1.1 В ходе каждой сварочной операции определенное количество основного металла из поверхностных слоев плавится под действием дуги и разбавляется жидким присадочным материалом. В этой связи глубина проплавления определяется как глубина расплавления основного металла, выраженная, например, в мм (в сечении шва или наплавленного валика). На практике, однако, эта величина важности не представляет. Удобным способом оценки свойств сварного шва является вычисление степени разбавления, которая представляет собой процентное содержание расплавленного основного металла в металле шва. Более того, определить степень разбавления достаточно просто: либо провести химический анализ металла шва, либо графическим или математическим методом достаточной точности, что можно сделать даже перед сваркой.

1.2 При использовании аналогичного по химическому составу присадочного материала разбавление не оказывает заметного влияния на сварной шов. Однако, при сварке ферритного основного металла с использованием аустенитных (содержащих феррит) сварочных материалов такое влияние может быть существенным.

В этом случае разбавленный металл шва будет обладать следующими характеристиками:

- Пониженное содержание Cr, Ni (Mo,...)
- Повышенное содержание С
- Структурные изменения

Последствия: снижение коррозионной стойкости, возможное охрупчивание и риск растрескивания вследствие формирования мартенсита.

Аналогичный эффект возникает по отношению к твердым сплавам для наплавки и сварочным материалам для конструкционных сталей и т.д., когда разбавление низколегированным основным металлом приводит к потере наплавленным металлом полезных свойств. Избежать проблемы можно только путем многослойной наплавки.

2. Влияющие факторы

2.1 Зависимость от способа сварки

Как известно, степень разбавления зависит от способа сварки (в соответствии с EN 24063).

Типичные значения:

Лента для электрошлаковой сварки (RES) (72)	8-15 %
Лента для сварки под флюсом (SAW) (122)	15-23 %
Пруток / проволока для сварки неплавящимся электродом (GTAW) (141)	15-30 %
Покрытые электроды для ручной дуговой сварки (SMAW) (111)	15-30 %
Проволока для сварки в защитном газе (GMAW) (13)	25-40 %
Проволока для сварки под флюсом (SAW) (121)	~ 50 %

Таким образом, высоколегированная проволока для GMAW и SAW демонстрирует наилучшие результаты при прямом использовании для сварки ферритного основного металла.

2.2 Влияние параметров сварки

Изменение параметров определенного способа сварки приводит к сильному изменению степени разбавления.

Для получения приемлемых результатов, особенно при сварке склонным к разбавлению способом, необходимо производить сварку с низкой погонной энергией, подобрав оптимальные условия (низкий ток, сварка узкими валиками без колебаний электрода, сварочные материалы малого диаметра, по возможности - промежуточное охлаждение, как можно большая скорость сварки). Скорость сварки ограничена следующими условиями:

- (а) предпочтительно горение дуги на затвердевшем металле шва, а не на ферритном основном металле;
- (б) должен обеспечиваться гарантированный провар.

3. Выбор способа сварки

Ниже приведены рекомендации по выбору сварочных материалов и способов сварки для каждой из областей применения с учетом особых условий и требований, основанных на величинах, указанных в п. 2.1.

3.1 Сварные соединения аустенитных сталей с ферритными:

Покрытые электроды, проволока/пруток для GTAW, специальная легированная проволока для GMAW и SAW.

3.2 Наплавка плакирующих покрытий:

Лента для RES, лента для SAW, покрытые электроды, пруток / проволока для GTAW.

3.3 Сварка плакированных деталей:

Однопроходный шов: лента для RES, лента для SAW, покрытые электроды, пруток / проволока для GTAW.

Многопроходный шов:

1-ый из промежуточных слоев: покрытые электроды, пруток / проволока для GTAW, (по возможности - лента для RES или SAW).

Верхние слои: лента для RES, лента для SAW, покрытые электроды, пруток / проволока для GTAW, проволока для GMAW.

С. Графическое и математическое определение структуры и химического состава сварного шва.

1. Структура

1.1 Диаграмма Шеффлера позволяет - в большинстве случаев с достаточной точностью – графически определять структуру основного металла, сварочного материала и металла шва. Для этого необходимо знать химический состав вышеупомянутых материалов.

Положения точек, указывающих на структуру материалов, вычисляются через их химический состав с помощью формул так называемых Cr- и Ni- эквивалентов, отложенных по осям абсцисс и ординат соответственно. При соединении этих точек на диаграмме получается «прямая разбавления», по которой можно определить структуру металла при любой степени разбавления.

Для нахождения точки, соответствующей определенной структуре, длина прямой принимается за 100 %, и по ней откладывается степень разбавления (средняя величина для приведенных в п. В 2.1 интервалов) для используемого способа сварки.

По положению этой точки на диаграмме возможно оценить пригодность выбранных условий сварки (сварочные материалы, способ и параметры) для получения шва с определенными свойствами.

1.2 Диаграмма Де-Лонга, усовершенствованная диаграмма Шеффлера, дополнительно учитывает аустенизирующее действие азота. Таким, образом, по ней с большей точностью можно определить структуру в области аустенит-феррит. Поскольку диаграмма Де-Лонга охватывает лишь небольшую область, она редко подходит для оценки структуры смешанных швов, так как они обычно не попадают в эту область.

1.3 Для оценки содержания феррита (>18 FN) в дуплексных и супердуплексных нержавеющей сталях может применяться диаграмма WRC, созданная в 1992 г.

2. Химический состав

Химический состав металла шва можно оценить из координат точки на диаграмме Шеффлера лишь приближенно, т.к. преобразовать Cr- и Ni-эквиваленты в содержания Cr, Ni (Mo...) весьма сложно. В частности, определить содержание C, значительно влияющего на коррозионную стойкость, невозможно.

Определить содержание компонентов с достаточной точностью возможно путем вычисления коэффициента разбавления. Коэффициент разбавления **M = степень разбавления (%) : 100**. Поскольку разбавленный металл шва содержит M частей основного металла и M-1 частей сварочного материала, то:

$$\begin{aligned} & \text{Компоненты основного металла} \times M \\ & + \text{компоненты сварочного материала} \times (M-1) \\ & = \text{компоненты разбавленного металла шва} \end{aligned}$$

Пример:

1. ферритный основной металл: 19 Mn 5
2. наплавка покрытым электродом Thermanit 25/14 EW 309L-17
Разбавление 25 %, то есть M=0,25

Хим. состав сплава	C	Si	Mn	Cr	Ni	Коэффициент разбавления
1	0,20	0,50	1,2	-	-	0,25 (=1a)
2	0,04	0,90	0,8	24,5	13	0,75 (=2a)
1a	0,05	0,13	0,3	-	-	
2a	0,03	0,68	0,6	18,4	9,8	
1a+2a*)	0,08	0,81	0,9	18,4	9,8	
Cr-	-	1,2	-	18,4	-	=19,6
эквивалент						
Ni-	2,4	-	0,5	-	9,8	12,7
эквивалент						

Результат:

Структура в соответствии с диаграммой Шеффлера - аустенит и около 3 % феррита.

*) Хим. состав металла шва

Наплавка плакирующих покрытий

Наряду с плакированием взрывом и прокаткой применяется метод наплавки плакирующих покрытий. Метод универсален, поскольку он позволяет наносить высоколегированные покрытия на металл-основу в любом виде (стальной прокат, отливки) без ограничений по форме и размерам изделия.

1. Требования

Коррозия

Поверхность плакирующего покрытия (точнее, поверхностный слой определенной толщины) должен отвечать требованиям по химическому составу с учетом всех областей применения изделия.

Механико-технологические величины

Как правило, основной металл представляет собой стенку какой-либо конструкции. Прочностные свойства плакирующего слоя, таким образом, определяются только выбором сварочных материалов с более высокими прочностными характеристиками, если только этого требует статический расчет. Плакирующее покрытие должно удовлетворять требованиям пластичности. Следовательно, не должно возникать ни твердых мартенситных включений или включений карбида хрома в переходной зоне, ни охрупчивания наплавленного металла.

2. Термическая обработка

Термическая обработка (ТО) (температура и длительность отпуска, скорость нагрева и охлаждения) назначается с учетом вышеупомянутых условий. Следует принимать во внимание кривую отпуска основного металла, стойкость к межкристаллитной коррозии (МКК) и склонность к охрупчиванию аустенитного плакирующего слоя (см. также диаграмму МКК по H.J. Rocha). В случае многослойного покрытия, ТО для снятия напряжений допускается проводить до нанесения верхнего слоя.

3. Сварочные материалы и способы сварки

Из-за эффекта разбавления для однослойной наплавки или промежуточных слоев при многослойной наплавке следует брать избыточно легированные сварочные материалы. Из способов сварки в этом случае рассматриваются только варианты с низкой степенью разбавления. Количество слоев определяется с помощью многократного вычисления коэффициента разбавления (см. выше).

Сварка плакированных деталей

Основные положения

Нижеследующие рекомендации по сварке распространяются на детали с высоколегированными плакирующими покрытиями, независимо от способа их нанесения: прокатка, взрыв или наплавка.

В таблицах 1 и 2 (см. ниже) представлены сварочные материалы Thermanit и способы сварки только для сварки покрытий, но не ферритного основного слоя.

А. Плакированные листы / сочетания материалов

Под плакированными листами здесь будут пониматься листы из котловых и мелкозернистых конструкционных сталей, плакированные высоколегированными нержавеющей и жаростойкими сталями или сплавами на Ni основе в любых сочетаниях. См. следующие таблицы.

Типичные марки для основного и плакирующего слоев

Основной слой		Плакирующий слой	
P235GH	StE 255, WStE 255, TStE	1.4000	1.4439
P265GH	255	1.4002	1.4462
H III	P275N, P275NH, P275NL	1.4301	1.4539
P295GH	StE 315	1.4306	1.4571
19 Mn 5	P355N	1.4311	1.4573
16 Mo 3	StE 380	1.4541	1.4580
16 Mo 5	S420N	1.4550	1.4876
13CrMo4-5	15MnNi6-3	1.4404	2.4816
10CrMo9-10	20MnMoNi4-5	1.4429	2.4856
	20MnMoNi5-5	1.4435	2.4858
		1.4438	2.4610

В. Требования к сварным соединениям

В основном следует придерживаться двух правил:

1. Коррозионная стойкость

Сторона сварного соединения, контактирующая с агрессивной средой, по коррозионной стойкости должна соответствовать требованиям к плакирующему материалу.

2. Механические свойства

Механико-технологические свойства сварного соединения не должны ухудшать свойств всего изделия.

При сварке плакирующего слоя недопустимо образование аустенитно-ферритных структур. Для предотвращения критического разбавления легирующих элементов, а также образования хрупкого мартенсита в переходной зоне, необходимо подбирать оптимальные условия сварки (способы и параметры сварки) и использовать наиболее высоколегированные сварочные материалы для однослойных швов, а также для первого или промежуточного слоя многослойного шва.

С. Сварочные материалы

Плакирующий слой - аустенитный (с содержанием феррита).

При оценке пригодности сварочных материалов для сварки плакирующих слоев различные способы разделки кромок следует рассматривать отдельно.

1. Двухсторонние швы

При выполнении двухсторонних швов сначала сваривается основной слой с использованием аналогичных или схожих по химическому составу сварочных материалов. Затем с использованием соответствующих сварочных материалов сваривается плакирующий слой.

Ни в коем случае нельзя использовать нелегированные или низколегированные сварочные материалы для сварки плакирующего слоя, а также аналогичных по химическому составу или более легированных металлов, так как это обязательно приводит к формированию мартенситных зон, плохо поддающихся деформированию.

См. «разделка кромок» в разделе F1 и «последовательность действий» в разделе G.

1.1 Однослойные швы

Следует использовать только высоколегированные сварочные материалы (более легированные, по сравнению с плакирующим слоем). В таблице 1 приведены соответствующие материалы марки Thermanit. При этом следует выбирать указанный способ сварки, обеспечивающий низкое разбавление. Необходимо также уделять внимание подбору оптимальных параметров сварки. В описании материалов марки Thermanit приведена более подробная информация по их использованию.

1.2 Многослойные швы

1.2.1 Первый слой / промежуточный слой

Предпочтительно использование только высоколегированных - аустенитных (содержащих феррит) - сварочных материалов. Сварочные материалы на никелевой основе, такие как Thermanit 82/182, применять не следует, т.к. из-за поглощения Ni из металла шва, верхний слой получится полностью аустенитным и склонным к горячему растрескиванию. При сварке плакирующих металлов на Ni основе промежуточный проход следует выполнять сварочными материалами на Ni основе.

Для выполнения промежуточных слоев прекрасно подходят сварочные материалы Thermanit. Для получения более подробной информации см. таблицу 2.

1.2.2 Верхний слой (слои)

Все сварочные материалы Thermanit, соответствующие плакирующему металлу. См. таблицу 2 и описания материалов марки Thermanit.

2. Односторонние швы с заполнением разделки со стороны основного слоя.

2.1 Сварка плакирующего слоя

При сварке плакирующего слоя следует избегать его разбавления металлом основного слоя. Обычно сварку производят способом GTAW с аналогичными по химическому составу или, в особых случаях, более легированными сварочными материалами, с поддувом защитного газа к корню шва.

2.2 Сварка основного слоя

При сварке основного слоя следует соблюдать рекомендации по сварке разнородных материалов.

Сварочный материал следует выбирать с расчетом получения механико-технологических характеристик сварного шва, достаточных для конкретного изделия.

См. раздел В.

Разделка кромок – в соответствии с разделом F2.

Примечание:

Диаграмма Шеффлера и расчет степени разбавления дает достаточно точное представление о структуре, образующейся на границе аустенит-феррит и о химическом составе разбавленного металла шва.

Плакирующий слой из ферритной хромистой стали

Сварка плакирующего слоя, эксплуатируемого в коррозионно-активных средах, например, серосодержащих, производится с использованием аустенитных сварочных материалов. Особенно рекомендуется для этих целей Thermanit CM. Также можно взять Thermanit Nicro 82 и 182. Для сварки плакирующих слоев, используемых в серосодержащих средах при температуре выше 450 °С, рекомендуется Thermanit 17.

D. Способы сварки

Покрытые электроды подходят для всех однослойных и многослойных швов и для швов с заполнением разделки со стороны основного слоя.

Поскольку электроды с рутиловым покрытием имеются в наличии в рамках программы поставки, их использование предпочтительно, благодаря меньшей глубине проплавления.

Способ GTAW в основном используется для выполнения корневых проходов швов с заполнением разделки со стороны основного слоя.

Данный способ также отлично подходит для сварки плакирующих слоев, в особенности, низкоуглеродистых. Благодаря, низкому содержанию углерода в присадочных прутках (не более 0,025 %), достаточно совсем немногих слоев для достижения стандартного содержания углерода в металле шва (не более 0,04 %).

Необходимое количество слоев вычисляется посредством расчета разбавления, см. выше.

Способ GMAW не следует использовать для 1-го слоя при сварке основного слоя в случае однослойного шва или для промежуточного слоя в случае многослойного шва. Возможно использование для облицовочного слоя при достаточно легированном промежуточном слое при оптимальных параметрах сварки.

Способ SAW (особенно подходит для сварки толстостенного основного слоя) абсолютно неприемлем для сварки плакирующего слоя из-за сильного разбавления (формирование мартенсита, науглероживание, разбавление легирующих элементов).

E. Термическая обработка

Если ТО необходима, то для достижения вышеупомянутых требований при выборе температуры и длительности ТО, скорости нагрева и охлаждения следует уделять внимание свойствам всех материалов, вовлеченных в процесс. Это включает температуру отпуска основного слоя и сварочных материалов, склонность к МКК (см. диаграмму МКК по Рочу) и охрупчиванию плакирующего слоя и сварочного материала.

F. Разделка кромок

Для основного слоя разделка производится со скосом двух кромок или с криволинейным либо ломаным скосом двух кромок. Угол разделки со скосом двух кромок приблизительно равен

60 °, с криволинейным скосом двух кромок - приблизительно 10 °. На рисунках ниже приведены поперечные сечения разделок кромок.

Однопроходная сварка плакированных сталей (табл. 1)

Плакирующие материалы				
№ мат.	Наименование материала	AISI	Сварочные материалы	Сварочный процесс
1.4000	X6Cr13	403	CM	111
1.4002	X6CrAl13	405	Nicro 82 Nicro 182 14 K	111, 141 111 111, 141
1.4301	X5CrNi18-10	304	25/14 E	111, 141
1.4306	X2CrNi19-11	304L	25/14 E	111, 141
1.4311	X2CrNiN18-10	304LN		
1.4401	X5CrNiMo17-12-2	316	18/17 E	111, 141
1.4404	X2CrNiMo17-12-2	316L	19/15 1)	111, 141
1.4429	X2CrNiMoN17-13-3	316LN		
1.4435	X2CrNiMo18-14-3	316L		
1.4438	X2CrNiMo18-15-4	317L	30/40 E	111, 141
1.4439	X2CrNiMoN17-13-5	S31726	625	
1.4571	X6CrNiMoTi17-12-2	316 Ti	18/17 E 1)	111, 141
1.4573	X10CrNiMoTi18-12	316 Ti		
1.4580	X6CrNiMoNb17-12-2	316 Cb		
2.4610	NiMo16Cr16Ti	C-4	Nimo C	111, 141
2.4816	NiCr15Fe	600	Nicro 82 Nicro 182	111, 141 111
2.4856	NiCr22Mo9Nb	625	625	111, 141
2.4858	NiCr21Mo	825	30/40 E	111, 141
1.4876	X10NiCrAlTi32-20	800 (H)	21/33 (So) Nicro 82 Nicro 182 617 625	111, 141 111, 141 111 111, 141 111, 141

Термообработка практически не требуется.

Температура эксплуатации сварного соединения до 300 °С максимум.

Сварочный процесс в соответствии с EN: 111 = покрытые электроды

141 = ТИГ процесс

Многопроходная сварка плакированных сталей (табл. 2)

№ мат.	Корневой или заполняющий слой		Облицовочный слой	
	Сварочные материалы	Сварочный процесс	Сварочные материалы	Сварочный процесс
1.4000	CM	111	CM	111
1.4002	Nicro 82	111, 141	Nicro 82	111, 131, 141
	Nicro 182	111	Nicro 182	111
	14 K	111, 141	14 K	111
1.4301	25/14 E	111, 141	H, HE	111, 135, 141
1.4306	25/14 E	111, 141	JE, H, HE	111, 135, 141
1.4311				
1.4401	23/11 MoZl	111, 141	GE, A, 18/17 E	111, 135, 141
1.4404	23/11 MoZl	111, 141	GE, A, 18/17 E	111, 135, 141
1.4429	25/14 E	111, 141		
1.4435	18/17 E	111, 141		
1.4438	18/17 E	111, 141	18/17 E	111, 135, 141
1.4439				
1.4462	22/09	111, 141	22/09	111, 141
1.4541	25/14 E	111, 141	H, HE	111, 135, 141
1.4550				
1.4571	23/11 MoZl	111, 141	A, GE, 18/17 E 1)	111, 135, 141
1.4573	25/14 E	111, 141		
1.4580				
2.4610	Nimo C	111, 141	Nimo C	111, 131, 141
2.4816	Nicro 82	111, 141	Nicro 82	111, 131, 141
	Nicro 182	111	Nicro 182	111
2.4856	625	111, 141	625	111, 131, 141
2.4858	30/40 E	111, 141	30/40 E	111, 141
1.4876	21/33	111, 141	21/33	111, 141
	Nicro 82	111, 141	Nicro 82	111, 131, 141
	Nicro 182	111	Nicro 182	111
	625	111, 141	625	111, 131, 141
	617	111, 141	617	111, 131, 141

Термообработка практически не требуется.

Температура эксплуатации сварного соединения до 300 °С максимум.

Сварочный процесс в соответствии с EN: 111 = покрытые электроды

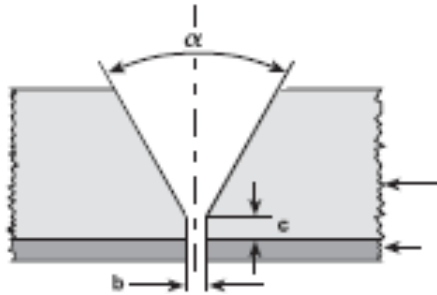
141 = ТИГ процесс

131 = МИГ/МАГ процесс в импульсном режиме

135 = МИГ/МАГ процесс в импульсном режиме

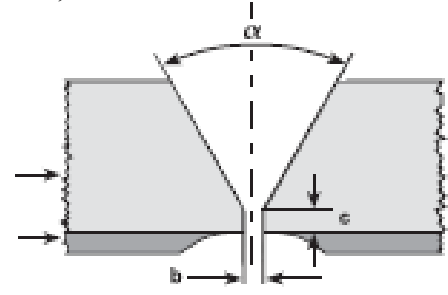
1) Двухсторонние швы

Разделка А
Толщина плакирующего слоя
– любая



Материал основы
Плакирующий
слой

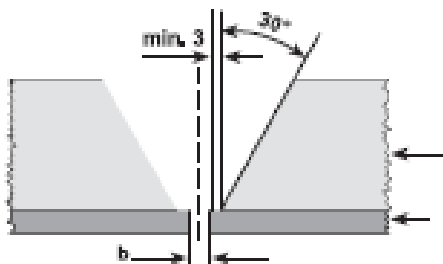
Разделка В
Толщина плакирующего слоя
 $\geq 2,5$ мм



Размер b может быть до 2 мм. Размер c зависит от способа сварки. При разделке В выполняется снятие плакирующего слоя во избежание его расплавления сварочным материалом при сварке основного слоя.

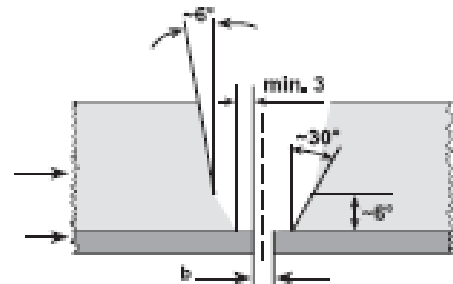
2) Односторонние швы с заполнением разделки со стороны основного слоя

Разделка А
Со скосом двух кромок



Материал основы
Плакирующий
слой

Разделка В
С ломаным скосом двух кромок



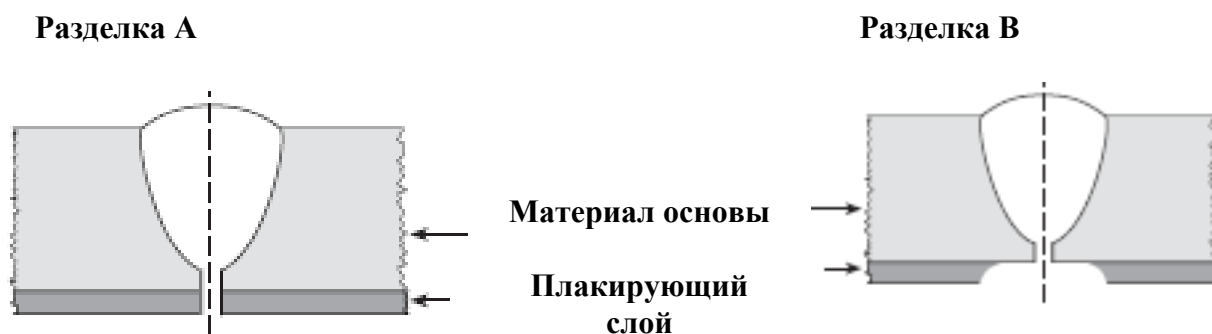
В обоих случаях необходимо оставлять зазор в 3 мм во избежание разбавления шва плакирующего материала металлом шва основного слоя. Размер b зависит от способа сварки.

Сварка производится сварочными материалами для плакирующего слоя.

Г. Последовательность действий при сварке двухсторонних швов

На рисунках 1А и 1В приведена последовательность действий при сварке основного слоя с разделкой со скосом двух кромок.

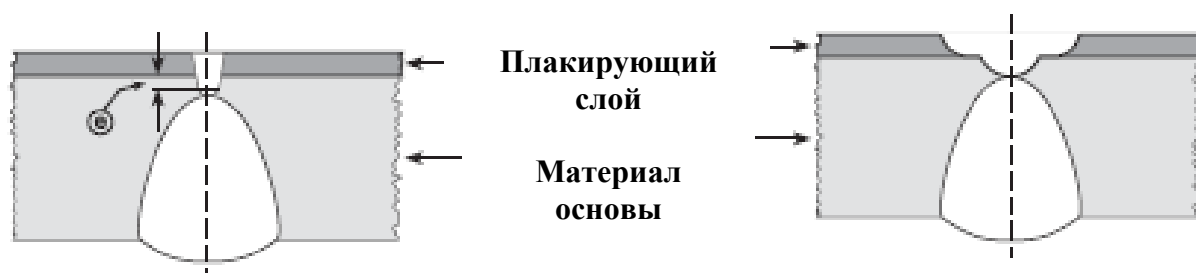
1) Сварка основного слоя



Основной слой сваривается с использованием подходящего аналогичного или схожего по химическому составу сварочного материала.

Не допускается расплавление плакирующего слоя при сварке корневого шва основного слоя.

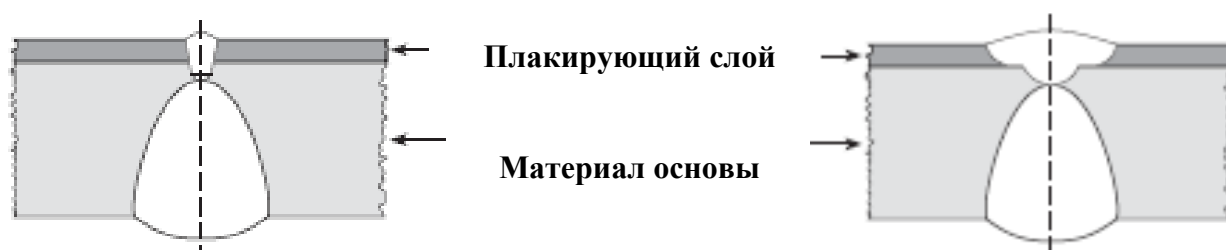
2) Разделка кромок плакирующего слоя и сварка перехода от основного слоя к плакирующему



Корень шва основного слоя удаляется до чистого металла.

Сварка перехода от основного слоя к плакирующему металлу для обеих разделок может выполняться высоколегированными сварочными материалами, подходящими для плакирующего слоя (при условии, что это не окажет отрицательного влияния на прочность соединения), а также сварочными материалами для основного слоя. При сварке перехода в случае разделки А с использованием сварочного материала для основного слоя, требуется оставлять зазор во избежание расплавления плакирующего слоя.

3) Сварка плакирующего слоя



В последнюю очередь сваривают плакирующий слой с использованием аналогичного по химическому составу или более легированного сварочного материала, отвечающего требованиям к плакирующему покрытию, в том числе, и прочностным.

Диаграмма межкристаллитной коррозии по Рочу

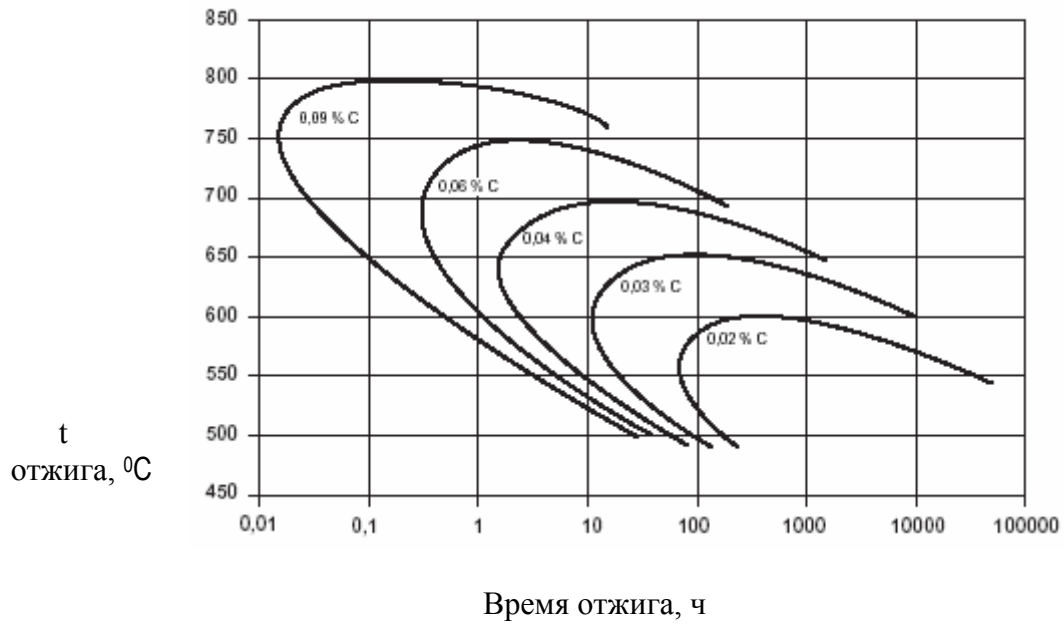


Диаграмма Шеффлера

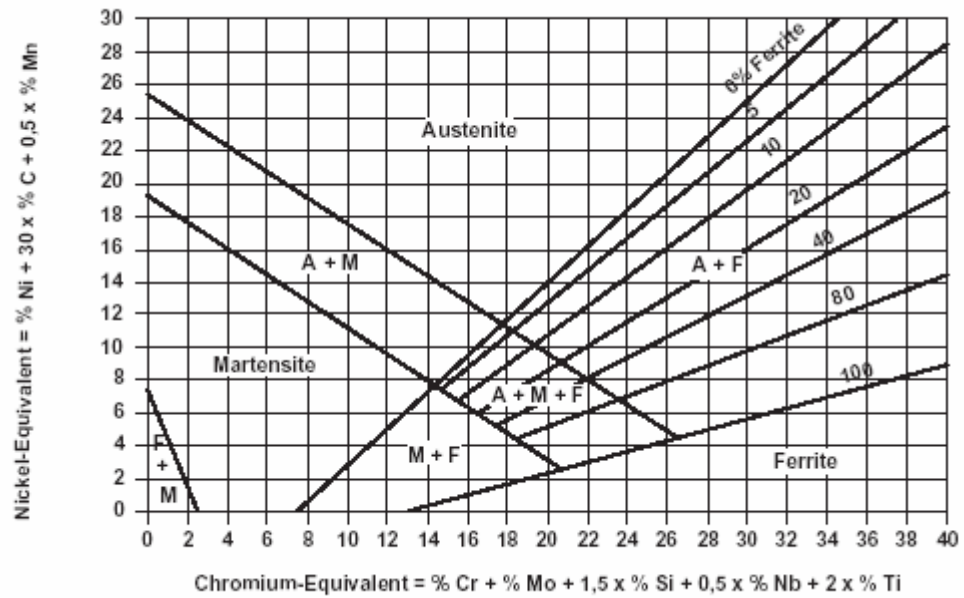


Диаграмма Делонга

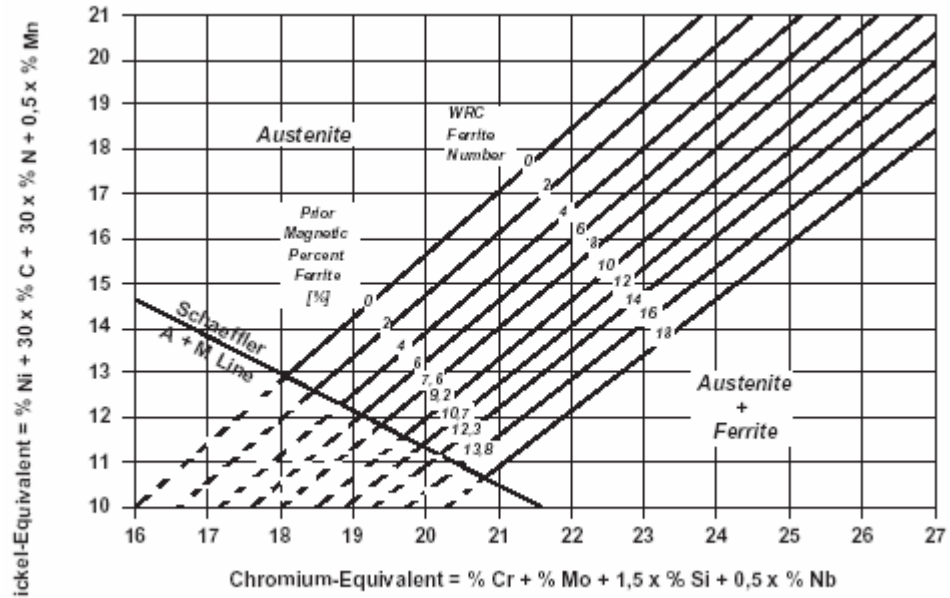


Диаграмма WRC 92

