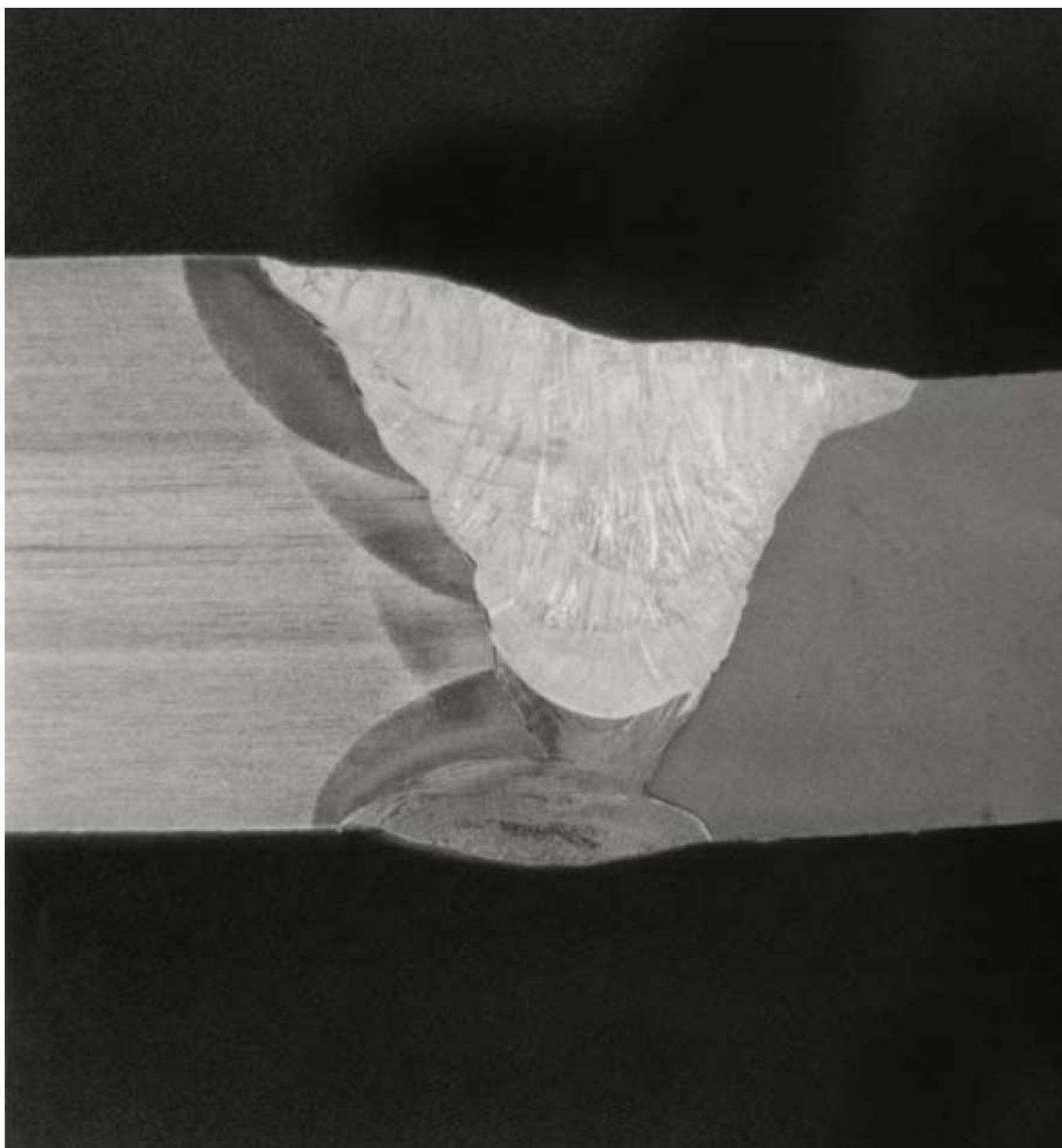




Руководство по сварке разнородных металлов



Ключ-таблица

				Со-сплавы	Ti-сплавы	Mg-сплавы	Al-сплавы	Cu-сплавы					Ni-сплавы					Сплавы на основе Fe																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
								Медно-никелевые	Al-бронзы	Si-бронзы	Sn-бронзы	Латуни	Чистая Cu	Хастеллой	Нимоник	Инконель	Монель	Чистый Ni	Чугун	Неизвестный состав	Нержавеющие стали			Пружинные инструм. стали	Н. л. стали		Углеродистые ст.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
							47	27					11					1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
Сплавы на основе Fe				Углерод. стали	Н. л. стали	C _E ≤ 0.4	C _E > 0.4	Инструментал. пружинные ст.	Нержавеющие стали		Аустенитн.	Ферритные	Феррито-аустенитн.	Неизвестный состав	Чугун	9	6	5	3	4	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
Ni-сплавы				Чистый Ni	Монель	Инконель	Нимоник	Хастеллой	Чистая Cu	Латуни	Sn-бронзы	Si-бронзы	Al-бронзы	Медно-никелевые	48	31	28	24	23	20	16	15	12	10	9	7	8	13	17	16	12	14	19	22	23	26	30	43	42	41	40	39	37	32	33	34	35	36	46	45	44	31	49	50	51	53	54	55																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								

Данное руководство разделено на 55 глав, построенных в возрастающем порядке

Общие рекомендации даны в следующих главах:

Глава 1 Сплавы на основе Fe

Глава 11 Сплавы на основе Ni

Глава 27 Сплавы на основе Cu

Глава 47 Сплавы на основе Al

В остальных главах даны рекомендации, применимые только для данного сочетания материалов

В главе 55 содержатся рекомендации по сварке комбинаций материалов, не вошедших в данную таблицу

Примеры пользования руководством

Пример 1: 9% Al-бронза + медно-никелевый сплав (90/10)

Найти общие рекомендации по сварки Cu-сплавы в главе 27

Найти специфические рекомендации в главе 46

Пример 2: Аустенитная нержавеющая сталь + углеродистая сталь

Найти общие рекомендации по сварке сплавов на основе Fe в главе 1

Найти специфические рекомендации в главе 6

Введение

В данном буклете представлена информация о процессах электродуговой сварки (MMA, GTAW, GMAW и SAW) и сварочных материалах, применяемых для сварки разнородных металлов и/или только сплавов. Информацию по сварке однородных металлов/сплавов можно найти в справочнике ESAB Welding Handbook.

При сварке разнородных металлов надо внимательно относиться к тому, чтобы:

- Наплавленный металл в разнородном сварном соединении не должен создавать хрупкие интерметаллидные структуры. Рекомендации, приведенные в данном справочнике, делаются с учетом этого условия. Потому в ряде рекомендаций, для некоторых комбинаций металлов, описывается технология сварки через буферный слой.
- Нет необходимости в том, чтобы металл сварного шва при сварке разнородных металлов, обладал более высокими прочностными и коррозионностойкими свойствами, чем наиболее «слабый» металл из свариваемой пары. А потому, перед сваркой необходимо проанализировать данные рекомендации с точки зрения прочности и коррозионной стойкости.
- Чтобы избежать водородного растрескивания, например, со стороны стальной кромки, обычно рекомендуется применять покрытые электроды с основной обмазкой.
- При сварке разнородных металлов обе кромки необходимо подвергать предварительному подогреву в соответствии с теми требованиями, которые предъявляются к каждому из них (см. главы 1, 11, 27 и 47).
- Когда используется GTAW процесс, в качестве присадочного материала можно использовать выпрямленные и очищенные проволоки для GMAW сварки аналогичного химического состава. В крайнем случае, иногда можно использовать тщательно очищенные полоски, нарубленные из листа. Однако это может привести к образованию хрупких интерметаллидных структур, поэтому их применение должно базироваться на достаточном практическом опыте.

Принятые сокращения:

MMA – дуговая сварка штучным покрытым электродом

FCW – дуговая сварка плавящейся флюсонаполненной электродной порошковой проволокой

GTAW – дуговая сварка неплавящимся вольфрамовым электродом в защитном инертном газе

GMAW – дуговая сварка плавящейся электродной проволокой сплошного сечения или металопорошковой проволокой в защитном активном (MAG) или инертном (MIG) газе

SAW – дуговая сварка под флюсом

Сварочные материалы, приведенные в данном справочнике, разделены по их назначению. Для получения информации о полной продуктовой линейке сварочных материалов ESAB, обратитесь в региональный офис ESAB или к справочнику «ESAB Welding Handbook». В нем вы найдете дополнительную информацию по сварочным материалам, такую как химический состав наплавленного металла, рекомендации по режимам сварки и т.д.

1. Прочитайте это перед тем как варить стали и чугуны

1.1. Стали низкоуглеродистые, низколегированные, инструментальные и стали неизвестного состава.

Свариваемость стали падает с повышением ее твердости. Следовательно, очень важно оценить возможные опасности при сварке. Наиболее распространенный способ, это подсчитать ее «Углерод-Эквивалент» (C_E):

$$C_E = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{\%(Ni + Cu)}{15}$$

Когда свариваются стали с различными C_E , параметры сварки подбираются по стали с высшим C_E , а присадочный материал по стали с низшим C_E . Это важно, чтобы избежать применения сварочного материала с завышенным C_E , что может повысить вероятность образования трещин. При правильном подборе присадочного материала и параметров сварки вы получите твердость и механические свойства наплавленного металла где-то между этими сталями.

Требуемая температура предварительного подогрева зависит от величины углерод-эквивалента. При сварке сталей с различными значениями C_E , температура предварительного подогрева подбирается по стали с высшим C_E .

C_E	Рекомендуемая температура предварительного подогрева
<0,4	<100°C
0,4-0,6	150-200°C
>0,6	250-300°C
Инструментальные стали Пружинные стали Стали неизвестного химического состава	} ~300°C

При значительной разнице в значениях C_E свариваемых сталей, по возможности рекомендуется производить отпуск для снятия напряжений. Для всех комбинаций сталей контролируемое охлаждение или снижение скорости охлаждения уменьшают риск образования трещин.

1.2. Нержавеющие стали с низкоуглеродистыми

Смешивание этих материалов приводит к образованию твердых хрупких структур. На рис. 1 показано, какие формируются структуры, в зависимости от химического состава сварочного материала. Нержавеющую сталь можно сварить с низкоуглеродистой или низколегированной с великолепным результатом. Однако некоторая внимательность и понимание вопроса все же требуется, т.к. многообразие комбинаций этих сталей не позволяет сформулировать

общих рекомендаций по их сварке, которые бы для всех случаев гарантировали приемлемый результат. Особенно положительный результат получается, если сталь обладает относительно хорошей свариваемостью и имеются четкие конкретные рекомендации по тому, как избежать образования трещин. Однако можно дать несколько наиболее часто встречающихся рекомендаций.

Для сварки высоколегированной стали с низкоуглеродистой или низколегированной, обычно рекомендуется использовать присадочный материал повышенного легирования (более легированный чем нержавеющая сталь). Наиболее часто применяются сварочные материалы следующего химического состава (в весовых %):

(23...25)%Cr + (11...15)%Ni (с Mo или без него), 29%Cr + 9% Ni и 18%Cr + 8%Ni + 6%Mn.

Для жаропрочных конструкций, предназначенных для эксплуатации при повышенных температурах выше 200°C, например в которых теплоустойчивые Cr-Mo стали свариваются с нержавеющими, необходимо применять сварочные материалы на Ni-основе. Применение сварочных материалов на Ni-основе позволяет предотвратить процесс миграции атомов углерода из Cr-Mo стали, содержащей его достаточно большом количестве, в металл шва (процесс известен под названием «миграция углерода»). Его можно наблюдать, когда для данных целей применяются сварочные материалы на основе нержавеющей стали, при этом образуются хрупкая прослойка науглероженного наплавленного металла и обезуглероженная зона Cr-Mo стали, имеющая пониженную сопротивляемость ползучести.

На практике используются два принципа сварки нержавеющих сталей с низкоуглеродистыми или низколегированными. Первый заключается в заполнении разделки сварочным материалом высоколегированной стали более высокого легирования или на основе Ni. Альтернативой является наплавка на кромку из черной стали переходного слоя материалом более высокого легирования, чем материал нержавеющей стали с последующим заполнением разделки присадкой аналогичной нержавеющей основному металлу.

1.2.1. Трещины в наплавленном металле

Если применяются сварочные материалы указанных выше типов, результат обычно получается положительным. К сожалению, если сварочный материал был выбран неправильно, в сварном шве можно обнаружить трещины.

Причиной трещин в сварном шве между высоколегированной и черной сталью могут стать склонность образовавшегося сплава к водородной хрупкости или к кристаллизационным трещинам. Если образование трещин возможно от обоих факторов, при выборе присадочного материала ориентируясь ни тот, из-за которого образование трещины более вероятно.

Причиной водородной хрупкости обычно является применение электродов с высоким содержанием влаги в обмазке или из-за того что кромки перед сваркой не были очищены от грязи, влаги или ржавчины. Сварка в неподходящих экстремальных условиях также может привести к образованию данного типа трещин.

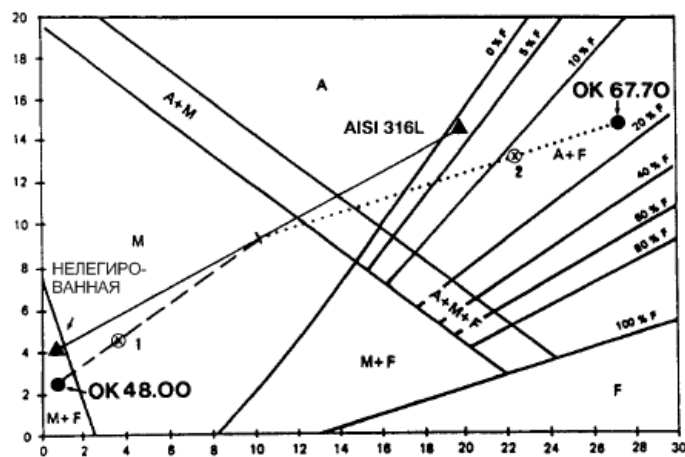
Возможно, что обе указанные выше причины оказали влияние на образование водородных включений, однако структура наплавленного металла оказывает на это наиболее существенное влияние, т.е. выбор присадочного материала.

При сварке происходит разбавление наплавленного металла металлом углеродистой или низколегированной стали. Если в качестве присадки используется низкоуглеродистый, низколегированный или недостаточно высоколегированный сварочный материал, в наплавленном металле могут частично или полностью формироваться мартенситные структуры (Рис.1, точка 1). Шов получается недопустимо твердым и имеет в дальнейшем тенденцию к образованию трещин, особенно при наличии в нем диффузионно-свободного водорода (Рис.2).

Риск образования водородных трещин, связанных с образованием в металле шва мартенситных структур, может быть значительно снижен за счет применения соответствующих сварочных материалов. Применение присадочных материалов высокого легирования или на основе Ni, позволяет скомпенсировать влияние на шов металла углеродистой или низколегированной стали (Рис.1, точка 2). Таким образом, формирование мартенситных структур ограничивается очень тонкой зоной по линии сплавления (Рис.3). Однако обычно эта зона настолько тонка, что не оказывает влияния на стойкость к образованию трещин.

Зона термического влияния (ЗТВ) в углеродистом или низколегированном основном металле может содержать различное количество мартенситной фазы, в зависимости от его химического состава, толщины основного металла, параметров сварки и т.д. Обычно эта зона не создает высокого риска образования трещин, в

$Ni\text{-эквивалент} = \% Ni + 30\% C + 0.5\% Mn + 30\% N$



$Cr\text{-эквивалент} = \% Cr + 1.5\% Si + \% Mo + 0.5\% Nb$

A = Аустенит, M = мартенсит, F = феррит

Рис. 1. Диаграмма Шеффлера-де-Лонги. Определение химического состава наплавленного металла при сварке нержавеющей стали с углеродистой. При его определении (точки 1 или 2), исходим из того, что доля участия каждого из основных металлов (сталь AISI 316L и низкоуглеродистая сталь) в сварном шве одинаковы, а доля участия присадочного материала составляет 70% от общего объема шва. Точка 1 иллюстрирует что получится, если эту комбинацию варить нелегированным электродом (OK 48.00), а точка 2, если высоколегированным (OK 67.70).

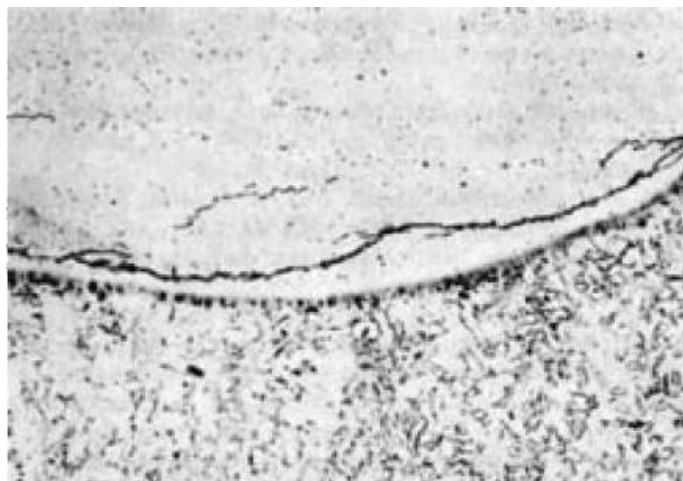


Рис. 2. Пример трещины по образовавшимся в наплавленном металле (сверху) водородным включениям при сварке нелегированной стали (внизу) с высоколегированной сталью. Увеличение 100х

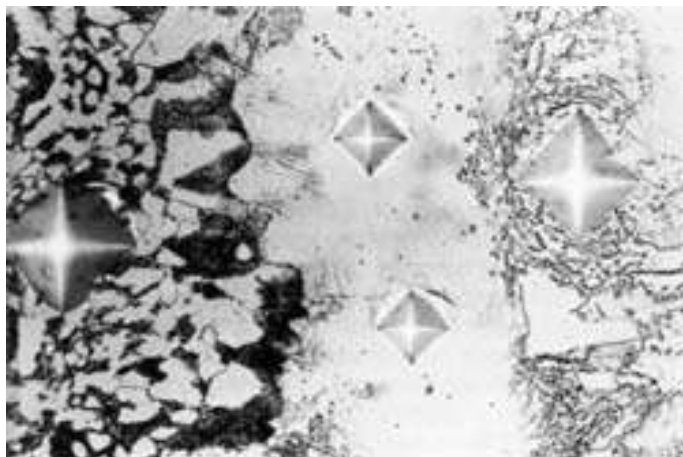


Рис. 3. Наплавка, выполненная электродом 308L на низкоуглеродистую сталь. Обратите внимание на образование на границе низкоуглеродистой стали твердой прослойки (отпечаток меньшего размера)

том случае, когда речь идет о вышеупомянутом риске насыщения материала водородом. При этом сварка выполняется такими сварочными материалами, которые создают сварочный шов с полностью или частично аустенитной структурой (см. пример т.2 на рис.1). Водород имеет очень хорошую растворимость в аустените. Таким образом, водород, находящийся в ЗТВ основного металла, адсорбируется аустенитной структурой шва, что снижает ее хрупкость.

Причиной кристаллизационных трещин обычно являются вредные загрязняющие элементы, которые переходят в шов из расплавленного низкоуглеродистого или низколегированного металла, которые образуют легкоплавкие прослойки по границам кристаллизующихся зерен в сварном шве. Таким образом, эта зона является наиболее слабым местом, в которой под воздействием напряжений, возникающих при остывании свариваемой конструкции, легко образуются трещины.

Аустенитная структура обычно более чувствительна к кристаллизационным трещинам, чем ферритная, а потому желательно чтобы сварной шов содержал некоторое количество ферритной фазы. Однако стойкость аустенитного металла к горячим трещинам можно также повысить и за счет повышения содержания в сварном шве Mn. Этого можно достигнуть, применяя сварочные материалы типа 18%Cr-8%Ni-6%Mn (OK 67.45 или OK Autrod/Tigrod 16.95), которые образуют наплавленный металл с высокой стойкостью к образованию трещин.

1.2.2. Рекомендации по сварке нержавеющей сталей с низкоуглеродистыми и низколегированными сталями

- Применяйте в качестве присадочных материалов нержавеющие сплавы более высокого легирования или сплавы на основе Ni.

- Прокаливайте электроды перед сваркой, тщательно очищайте свариваемые поверхности.

- Сварка обычно выполняется без предварительного подогрева.

Однако необходимо придерживаться рекомендаций, характерных для сварки конкретных марок сталей.

В случаях, когда не требуется применение присадочных материалов на Ni-основе, наиболее часто применяются сварочные материалы на основе высоколегированных сталей типа (23...25)%Cr-(11...15)%Ni (с добавкой Mo или без). Наиболее распространенные из них OK 67.70, OK 67.75 или OK Autrod/Tigrod 309L. Однако сейчас имеет место тенденция к повышению применяемости сварочных материалов типа 18%Cr-8%Ni-6%Mn (OK 67.45 или OK Autrod/Tigrod 16.95). Данный тип присадочного материала обычно образует полностью аустенитную структуру сварного шва, обладающую сравнительно более низкими прочностными свойствами, но имеющую более высокую стойкость к образованию горячих трещин. Относительно более мягкий металл создает меньшие напряжения в возможных мартенситных структурах, что, таким образом, приводит к снижению риска возникновения трещин из-за наличия в металле свободного водорода. Кроме того, в большинстве случаев выбор присадочного металла типа 18%Cr-8%Ni-6%Mn, может явиться более предпочтительным в сравнении с другими, когда допускается применение сварочных материалов с подобными низкими прочностными свойствами.

В конце хочется отметить, что если один из свариваемых материалов является тяжело свариваемая высоколегированная сталь, особенно мартенситная, ферритная или с высоким содержанием углерода, основной вопрос в выдаче рекомендаций по их сварке заключается в правильном подборе присадочного металла.

Однако, если придерживаться вышеуказанных основных рекомендаций, для большинства наиболее распространенных аустенитных и аустенитно-ферритных сталей не существует проблем, связанных с их сваркой с черными конструкционными сталями.

1.3. Чугун со сталью

Выбор сварочных материалов и параметров сварки для данной комбинации определяется ограниченной свариваемостью чугуна. Для этой цели можно применять только присадочные материалы на Ni-основе, если к сварному шву не предъявляются какие-либо другие требования по прочности. Сварочные процессы, связанные с высоким удельным тепловложением или образованием большой сварочной ванны являются нежелательными. Некоторые типы чугунов, такие как белый чугун с высоким содержанием углерода, являются несвариваемыми из-за их склонности к образованию трещин. Для большинства случаев, когда требуется чугун приварить к стали, это можно сделать напрямую сварочным материалом на основе Ni, разработанным специально для сварки чугунов. Однако когда шов испытывает критические нагрузки или деформации, этого может оказаться недостаточно. В этих случаях перед сваркой

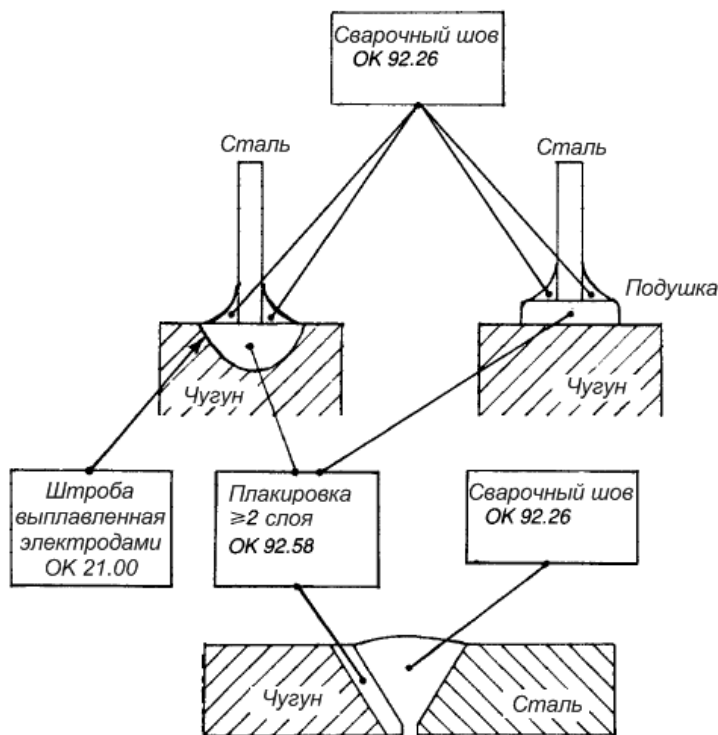


Рис. 4. Сварка чугуна со сталью

необходимо на чугунные кромок наплавить переходный слой присадочным материалом на Ni-основе, как это показано на рис.4. Сварка чугуна может быть выполнена без предварительного подогрева, однако, если рабочая температура изделия более ~300°C, его, по возможности, надо производить. Маленькие детали подвергают общему нагреву, в то время большие заготовки подогреваются вокруг зоны сварки.

Т.к. чугун обладает низкой пластичностью и низким коэффициентом линейного расширения, важно снизить усадочные напряжения, возникающие в сварном шве. Лучшим способом достижения этого является проковка сварного шва сразу после сварки ударным инструментом со скругленным бойком. Также для этого рекомендуется применять электроды малых диаметров и наплавку выполнять короткими валиками (3-5 см) без поперечных колебаний электрода. По этой же причине рекомендуют дугу наклонять на предыдущий валик, а не на основной металл.

Обычно для этой сварки используют MMA-процесс, хотя для многопроходной сварки можно использовать и GMAW.

2. Закалившиеся углеродистые стали с низкоуглеродистыми

Рекомендуемые сварочные материалы

MMA:	OK 48.XX, OK 53.18 ^{*)} , OK Femax 38.XX
SAW:	OK Autrod 12.10/OK Flux 10.61 или 10.62 OK Autrod 12.10/OK Flux 10.71
GMAW:	OK Autrod 12.51

^{*)} OK 53.18 дают в наплавке очень мягкую сталь (%C≤0,03), что позволяет применять их для наплавки переходного слоя на кромку упрочняемой стали

3. Низколегированные стали с низкоуглеродистыми

Параметры сварки подбираются под низколегированную сталь, а присадочный материал под низкоуглеродистую. Ограниченная миграция легирующих элементов при сварке из низколегированной стали обычно не приводит к повышению склонности наплавленного металла к закалке для всех основных видов сварки. Следовательно, низколегированные присадочные материалы соответствующего химического состава могут также успешно применяться для сварки этих комбинаций. Однако их применение не оказывает положительного влияния на прочностные свойства сварного соединения.

Рекомендуемые сварочные материалы

Углеродистые стали с $C_E \leq 0,4$ с низколегированными сталями

MMA: OK 48.XX, OK 53.18^{*)}, OK Femax 38.XX

SAW: OK Autrod 12.10/OK Flux 10.61 или 10.62

GMAW: OK Autrod 12.51

Углеродистые стали с $C_E \geq 0,5$ с низколегированными сталями

MMA: OK 48.08, OK 53.18^{*)}, OK 55.00

SAW: OK Autrod 12.22/OK Flux 10.71
OK Autrod 12.24/OK Flux 10.71

GMAW: OK Autrod 12.51

^{*)} OK 53.18 дают в наплавке очень мягкую сталь ($\%C \leq 0,03$), что позволяет применять их для наплавки переходного слоя на кромку низколегированной стали. Данная наплавка рекомендуется для низколегированных сталей с высоким C_E

4. Различные низкоуглеродистые стали друг с другом

Термин «низколегированная сталь» является отчасти неопределенным и включает в себя ряд различных комбинаций легирующих элементов. Некоторые из них могут быть достаточно

тяжело свариваемыми, однако, если обе свариваемые кромки относятся к одному типу легирования, но при этом они будут иметь различные C_E , сварка подобных комбинаций, как правило, не создает серьезных проблем. Для этого используются сварочные материалы идентичного типа легирования. По возможности, C_E присадочного материала должно быть близко к C_E стали с наименьшей склонностью к закалке. Для сварки сталей, обладающих высокой склонностью к закалке, не рекомендуется применять какие-либо другие способы сварки кроме MMA.

В таблицах 1.1, 1.2, 1.3 и 1.4 даны рекомендации по применению присадочных материалов для сварки сочетаний основных групп известных низколегированных сталей.

Когда точно известно сочетание свариваемых марок сталей, можно подобрать и другие подходящие для решения данной задачи сварочные материалы.

Однако, рекомендуемые сварочные материалы должны давать бездефектный шов для большинства возможных случаев.

При сварке желательно ограничивать удельное тепловложение, т.к. при высоком тепловложении может образовываться широкая ЗТВ, чувствительная к образованию холодных трещин. Потому следует избегать слишком медленных скоростей сварки.

Высокопрочные CrNi(Mo) стали, обладающие очень высокой склонностью к закалке, требующие предварительного подогрева до достаточно высоких температур, а часто и послесварочной термообработки, могут создать проблемы с их сваркой, связанные с трудностью нагрева данных изделий. В этом случае существуют компромиссные решения, связанные с применением аустенитных сварочных материалов, для которых не нужен или минимален предварительный подогрев. Это электроды для MMA-сварки марок OK 67.70, OK 68.81 или OK 68.81 и проволоки для GMAW-сварки марок OK Autrod 312 или OK Autrod 16.95

Таблица 1.1

Сварочные материалы (MMA):

		CrNi(Mo) стали	CrMo(V) стали	(Mn)NiMo стали	$\leq 3,5\%Ni$ стали	MnMo стали
MnMo стали	I	OK 74.78	OK 74.78	OK 74.78	OK 74.78	OK 74.78 ($C_E \leq 0,4$)
	II	FILARC 118 ($C_E \sim 0,6$)	OK 76.18 ($C_E \sim 0,5$)	FILARC 98S ($C_E \sim 0,4$)		
	III		OK 78.16 ($C_E \sim 0,6$)			
$\leq 3,5\%Ni$ стали	I	OK 73.79	*	OK 73.79	OK 73.79 ($C_E \leq 0,4$)	
	II	OK 73.68		OK 73.68	OK 73.68 ($C_E \sim 0,4$)	
	III	FILARC 118		FILARC 108		
(Mn)NiMo стали	I	FILARC 98S	FILARC 108	FILARC 98S		
	II	FILARC 118	OK 78.16			
CrMo(V) стали	I	OK 76.18	OK 76.18			
	II	FILARC 118	OK 78.16			
CrNi(Mo) стали	I	FILARC 118		I применять в первую очередь II применять во вторую очередь III применять в третью очередь		

*редко применяемая на практике комбинация

Таблица 1.2

Сварочные материалы (SAW):

	CrNi(Mo) стали	CrMo(V) стали	(Mn)NiMo стали	≤3,5%Ni стали	MnMo стали
MnMo стали	I OK Autrod 12.24 OK Flux 10.71	OK Autrod 12.24 OK Flux 10.71	OK Autrod 12.24 OK Flux 10.71	OK Autrod 12.24 OK Flux 10.71	OK Autrod 12.24 OK Flux 10.71 (C _E ≤0,4)
	II OK Autrod 13.49 OK Flux 10.62	OK Autrod 12.34 OK Flux 10.71	OK Autrod 13.49 OK Flux 10.62 (C _E ~0,5)	OK Autrod 13.27 OK Flux 10.62 (C _E ≤0,4)	OK Autrod 12.34 OK Flux 10.71 (C _E ~0,5)
≤3,5%Ni стали	I OK Autrod 13.27 OK Flux 10.62	*	OK Autrod 13.27 OK Flux 10.62	OK Autrod 13.27 OK Flux 10.62	
	II OK Autrod 13.43 или 13.44 OK Flux 10.71 (C _E ~0,6)		OK Autrod 13.49 OK Flux 10.62		
	III OK Autrod 13.43 OK Flux 10.62 (C _E ~0,7)				
(Mn)NiMo стали	I OK Autrod 13.49 OK Flux 10.62	OK Autrod 13.49 OK Flux 10.62	OK Autrod 13.44 OK Flux 10.71		
			OK Autrod 13.40 или 13.49 OK Flux 10.62 (C _E ≤0,5)		
	II OK Autrod 13.43 OK Flux 10.71	OK Autrod 13.10SC OK Flux 10.62 (C _E ~0,5)	OK Autrod 309L или 309MoL OK Flux 10.93 (C _E ~0,5)		
	III OK Autrod 13.43 OK Flux 10.62				
CrMo(V) стали	I OK Autrod 13.49 OK Flux 10.62	OK Autrod 13.10SC OK Flux 10.62			
	II OK Autrod 13.43 OK Flux 10.71				
	III OK Autrod 13.43 OK Flux 10.62				
CrNi(Mo) стали	I OK Autrod 13.21 OK Flux 10.71 (C _E ≤0,6)				
	II OK Autrod 13.44 OK Flux 10.71 (C _E ~0,6)				
	III OK Autrod 13.43 OK Flux 10.62				

*редко применяемая на практике комбинация

I применять в первую очередь
 II применять во вторую очередь
 III применять в третью очередь

Таблица 1.3

Сварочные материалы (GTAW):

	CrNi(Mo) стали	CrMo(V) стали	(Mn)NiMo стали	≤3,5%Ni стали	MnMo стали
MnMo стали	OK Tigrod 13.09	OK Tigrod 13.09	OK Tigrod 13.09	OK Tigrod 13.09	OK Tigrod 13.09 (C _E ≤0,4)
≤3,5%Ni стали	OK Tigrod 55	*	OK Tigrod 13.09		
(Mn)NiMo стали	OK Tigrod 55 (C _E ~0,5)	OK Tigrod 55 (C _E ≤0,5)			
CrMo(V) стали	OK Tigrod 55	OK Tigrod 13.12 (C _E ~0,6)			
CrNi(Mo) стали	OK Tigrod 55				

*редко применяемая на практике комбинация

Таблица 1.4

Сварочные материалы (GMAW, FCW):

	CrNi(Mo) стали	CrMo(V) стали	(Mn)NiMo стали	≤3,5%Ni стали	MnMo стали
MnMo стали	I OK AristoRod 13.09	OK AristoRod 13.09	OK AristoRod 13.09	OK AristoRod 13.09	OK AristoRod 13.09 (C _E ~0,4)
	II OK Tubrod 14.02 или Dual Shield MoL	OK Tubrod 14.02 или Dual Shield MoL	OK Tubrod 14.02 или Dual Shield MoL	OK Tubrod 14.02 или Dual Shield MoL	OK Tubrod 14.02 или Dual Shield MoL (C _E ≤0,4)
≤3,5%Ni стали	I OK AristoRod 55 (C _E ≤0,5)	*	OK Tubrod 14.04 (C _E ≤0,4)	OK Tubrod 14.04	
	II		OK Tubrod 15.25	OK Tubrod 15.25 (C _E ~0,3)	
(Mn)NiMo стали	OK AristoRod 55	OK AristoRod 69 (C _E ~0,5)	OK Tubrod 14.03 (C _E ~0,5)		
CrMo(V) стали	I OK AristoRod 69	OK AristoRod 13.12 (C _E ~0,6)			
	II OK AristoRod 55	Dual Shield CrMo1			
CrNi(Mo) стали	I OK AristoRod 69				
	II OK AristoRod 55				

*редко применяемая на практике комбинация

I применять в первую очередь

II применять во вторую очередь

5. Инструментальные, пружинные и т.п. стали с углеродистыми и низколегированными сталями

Данные стали относятся к типу тяжело свариваемых, у которых вследствие полиморфных фазовых превращений, происходящих при нагреве и охлаждении, повышается риск сварочных поводов, трещин и т.п. Их сварка иногда требует применения специальных приемов, которые являются достаточно сложными, а иногда и неприемлемыми при сварке разнородных материалов (например, ступенчатая сварка). Однако приемлемых результатов сварки можно достичь, придерживаясь следующих рекомендаций:

Рекомендуемые сварочные материалы

MMA: OK 68.81 или 68.82
OK 67.45

FCW: OK Tubrod 15.34

GTAW: OK Tigrod 312
OK Tigrod 16.95

GMAW: OK Autrod 312
OK Autrod 16.95

В некоторых случаях (таких как ручная сварка изделий небольшой толщины (до 10 мм)), сварку можно осуществлять без предварительного подогрева, однако в большинстве случаев его необходимо выполнять, подогревая изделие до температуры около 300°C, которую необходимо поддерживать в течении всего процесса сварки. Для минимизации размеров ЗТВ, сварку необходимо выполнять с минимальным тепловложением. Размеры сварочной ванны также должны быть минимальными для уменьшения доли участия основного металла в шве.

6. Высоколегированные нержавеющие стали с углеродистыми и низколегированными сталями

(общие рекомендации см. гл. 1.2)

Хотя большинство углеродистых и низколегированных сталей можно сваривать с высоколегированными без предварительного подогрева, более лучших результатов можно добиться, если кромку стыка из черной стали подогреть до температуры около 150°C. По зоне шва, прилегающей к линии сплавления с нелегированной сталью, всегда образуется небольшое количество мартенситной структуры. Как правило это не вызывает проблем, однако захват водорода сварочной дугой может привести к повышению вероятности образования холодных трещин. Умеренный подогрев ускоряет процесс миграции водорода из зоны сварки, понижая опасность трещинообразования. Предварительный подогрев особенно полезен, если для сварки применяются электроды с рутиловым покрытием.

Рекомендуемые сварочные материалы, см. таб. 2

На практике достаточно часто приходится сталкиваться с разнородными сварными соединениями между аустенитными нержавеющими сталями и низколегированными теплоустойчивыми хромо-молибденовыми сталями при сварке нагревательных бойлеров. В подобных конструкциях нержавеющие трубы иногда привариваются к Cr-Mo стали высоколегированными электродами. Наиболее слабым местом этой конструкции является граница между наплавленным металлом шва и низколегированной кромкой соединения. В процессе эксплуатации углерод мигрирует из низколегированной стали в сварной шов, где формирует обогащенную углеродом пограничную зону. Рано или поздно это может привести к образованию трещины в сварном соединении (см. рис.5). Если для данного соединения применять сварочные материалы на Ni-основе, сварной шов остается практически нечувствительным к данному эффекту в сравнении со сварочными материалами на основе высоколегированных сталей при тех же условиях эксплуатации. Результаты, полученные после непрерывной высокотемпературной выдержки в течение порядка 10 000 час, образцов сваренных материалами на Ni-основе продемонстрированы на рис.6. Полученный результат позволяет гарантировать, что сварное соединение по окончании высокотемпературных испытаний не будет склонно к разрушению. Для данного типа соединения рекомендуются следующие присадочные материалы:

MMA: OK 92.26

GMAW: OK Autrod 19.85

Таблица 2

Высоколегированные стали с углеродистыми и низколегированными соответственно

	Аустенитные		Ферритные	Феррито-аустенитные
MMA: Углеродистые или низколегированные с $C_E \leq 0,4$	I	OK 67.70 или 67.75	OK 67.75	OK 67.50 или 67.70 OK 68.81 или 68.82
	II	OK 63.35	OK 67.70	
	III	OK 67.60	OK 67.45	
	IV	OK 67.45		
Углеродистые или низколегированные с $C_E \geq 0,5$	I	OK 67.75	OK 67.75	OK 67.50 или 67.70
	II	OK 63.35	OK 67.70	OK 68.81 или 68.82
	III	OK 67.45	OK 67.45	
SAW: Углеродистые или низколегированные		OK Autrod 309L или 2209 OK Flux 10.92 или 10.93	OK Autrod 309L или 2209 OK Flux 10.92 или 10.93	OK Autrod 309L OK Flux 10.92 или 10.93
FCW: Углеродистые или низколегированные		OK Tubrod 15.34 Shield-Bright 309L Shield-Bright 309LMo	OK Tubrod 15.34 Shield-Bright 309L Shield-Bright 309LMo	OK Tubrod 15.34 Shield-Bright 309L Shield-Bright 309LMo
GTAW: Углеродистые или низколегированные	I	OK Tigrod 309L	OK Tigrod 309L	OK Tigrod 309L
	II	OK Tigrod 16.95	OK Tigrod 16.95	OK Tigrod 16.95
GMAW: Углеродистые или низколегированные	I	OK Autrod 309Si	OK Autrod 309Si	OK Autrod 410NiMo
	II	OK Autrod 16.95	OK Autrod 16.95	OK Autrod 16.95

I применять в первую, II применять во вторую, III применять в третью, IV применять в четвертую очередь

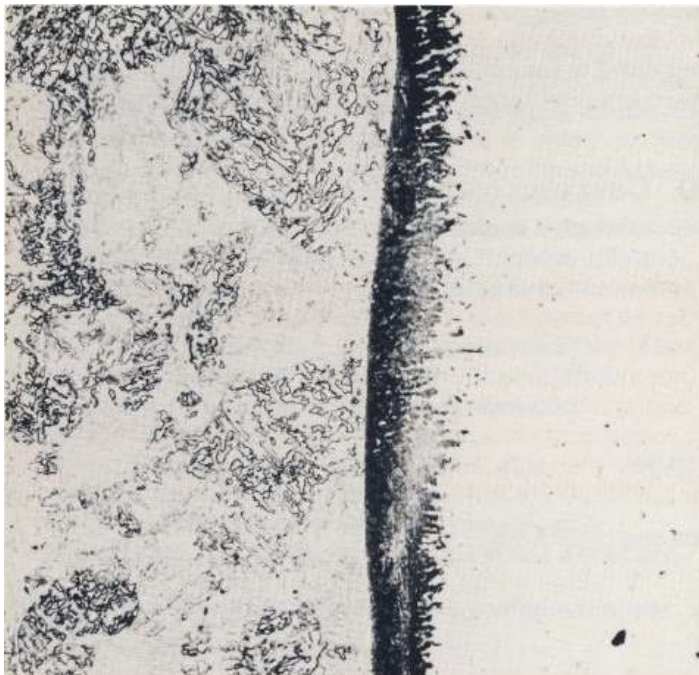


Рис. 5. Сварка низколегированной стали 2,3%Cr-1%Mo с высоколегированной 16%Cr-10%Ni-Nb. Металл шва: 18%Cr-10%Ni-Nb. Хрупкая насыщенная углеродом зона по границе линии сплавления образовалась за счет миграции углерода из стали 2,3%Cr-1%Mo (после выдержки в течении примерно 9 000 час в диапазоне температур от 500 до примерно 600°C). Увеличение 100х.



Рис. 6. Сварка низколегированной стали 2,3%Cr-1%Mo с высоколегированной 16%Cr-10%Ni-Nb. Металл шва: Inconel. Отсутствие науглероженной зоны по границе линии сплавления (после выдержки в течении примерно 9 000 час в диапазоне температур от 500 до примерно 600°C). Увеличение 300х.

7. Высоколегированные нержавеющие стали с инструментальными, пружинными и т.п. сталями

Для этих целей можно применять только те сварочные материалы, которые не претерпевают полиморфных превращений, не чувствительны к разбавлению основным металлом и обладающие достаточно высокой пластичностью. Основное, в той или иной степени универсальное требование, которое необходимо соблюдать – это не применять других сварочных материалов, кроме тех которые в наплавке дают аустенитную нержавеющую сталь или сплав на основе Ni.

Рекомендуемые сварочные материалы

	<i>Отпуск после сварки не выполняется</i>	<i>Отпуск после сварки можно выполнять</i>
MMA:	OK 68.81 OK 68.82 OK 67.75	OK 92.26 OK 67.75
FCW:	OK Tubrod 15.34	OK Tubrod 15.34
GTAW:	OK Tigrod 16.95	OK Tigrod 16.95
GMAW:	OK Autrod 312 OK Autrod 16.95	OK Autrod 19.85 OK Autrod 16.95

OK 68.81, OK 68.82 и OK Autrod 312 обладают очень низкой чувствительностью к разбавлению металла шва основным металлом, а потому наиболее часто, по сравнению с другими сварочными материалами, применяются сварки подобных сочетаний. Однако, из-за выпадения хрупкой σ -фазы, при их нагревании до температур в интервале 450-900°C, они становятся склонными к образованию трещин. Потому их нельзя применять, когда требуется производить послесварочную термообработку или толщина изделия требует использования многопроходной сварки. В этих случаях лучше использовать OK 92.26 и OK Autrod 16.85, если требуются повышенные прочностные характеристики сварного шва или сварное соединение эксплуатируется в условиях значительных температурных колебаний, и OK 67.45, OK Tubrod 15.34 и OK Autrod 16.95, если подобных требований нет.

8. Разнородные высоколегированные нержавеющие стали друг с другом

Данные комбинации сталей могут применяться при производстве некоторых конструкций. Как правило, при сварке этих комбинаций, сложностей с получением бездефектного шва не возникает.

Однако следует принимать во внимание следующие аспекты:

- Оценить фазовое состояние наплавленного металла по диаграмме Шеффлера (см. рис.1).

Рассчитанное фазовое состояние наплавленного металла не должно попадать в области с мартенситными структурами. Если структура наплавленного металла попадает в чисто аустенитную зону, следует остерегаться образования горячих трещин и ограничивать применение подобных сварочных материалов, за исключением тех, которые легированы более чем 4% марганца.

- Когда свариваются карбидостабилизированные нержавеющие высоколегированные стали (легированные либо Ti, либо Nb) с нестабилизированными нержавеющими сталями, следует применять карбидостабилизированные сварочные материалы (в таб.3 отмечены индексом S) или сварочные материалы с пониженным содержанием углерода (в таб.3 отмечены индексом L). Ни при каких условиях не применяйте сварочные материалы с повышенным содержанием углерода не содержащих карбидостабилизаторов.

- При сварке необходимо ограничивать тепловложение.

Рекомендуемые сварочные материалы приведены в таблице 3.

9. Стали неизвестного или вызывающего сомнения состава с другими сталями

Подобные комбинации могут иметь место, когда выполняется работы по ремонту каких либо старых стальных конструкций или химический состав стали невозможно проанализировать по экономическим или техническим причинам.

К сталям неизвестного химического состава всегда следует относиться как к тяжело свариваемым сталям, и они требуют соответствующего с ними обращения. Для их сварки следует применять те же сварочные материалы, что и для инструментальных и пружинных сталей. Наиболее предпочтительным способом сварки для подобных комбинаций является сварка штучными покрытыми электродами (ММА).

Рекомендуемые сварочные материалы

ММА:	OK 68.81 или 68.82 OK 92.26 OK 67.45
FCW:	OK Tubrod 15.34
GTAW:	OK Tigrod 19.85 OK Tigrod 16.95
GMAW:	OK Autrod 312 OK Autrod 19.85 OK Autrod 16.95

Не прибегать к предварительному подогреву, если сталь не магнититься.

Для всех остальных сталей неизвестного или сомнительного химического состава необходимо выполнять предварительный подогрев до температуры около 300°C!

Избегать высоких тепловложений и не допускать сильного разбавления металла шва основным металлом (см. гл. 7).

10. Чугуны со сталями

Рекомендуемые сварочные материалы

	<i>Для наплавки переходного слоя на чугунную кромку</i>	<i>Для сварки со стальной кромкой</i>
ММА:	OK 92.60 OK 92.18 OK 92.78	OK 92.26 OK 92.60 OK 92.18
FCW:	Nicore 55	
GMAW:		OK Autrod 19.85

Читайте также рекомендации в главе 1.3!

Таблица 3

Высоколегированные стали

		Ферритные	Феррито-аустенитные
ММА: Аустенитные нержавеющие стали	I	OK 67.70 ^L или 67.75 ^L	OK 63.30 ^L
	II	OK 62.75	OK 63.41 ^L
	III		OK 62.75
	IV		OK 61.81 ^S или OK 63.80 ^S
Ферритные нержавеющие стали	I		OK 67.70 ^L или 67.75 ^L
	II		OK 62.75
	III		OK 68.81 или OK 68.82
SAW: Аустенитные нержавеющие стали	I		OK Autrod 316L ^L OK Flux 10.92 или 10.93
	II	OK Autrod 309L ^L OK Flux 10.92 или 10.93	OK Autrod 317L ^L , OK Autrod 347 ^S или OK Autrod 318 ^S OK Flux 10.92 или 10.93
			OK Autrod 309L ^L OK Flux 10.92 или 10.93
Ферритные нержавеющие стали			
GTAW: Аустенитные нержавеющие стали		OK Tigrod 309L ^L	OK Tigrod 316L ^L , OK Tigrod 317L ^L , OK Tigrod 347Si ^S или OK Tigrod 318Si ^S
			OK Tigrod 309L ^L
Ферритные нержавеющие стали			
GMAW: Аустенитные нержавеющие стали	I	OK Autrod 309LSi ^L или OK Autrod 309Si	OK Autrod 316LSi ^L
	II		OK Autrod 317L ^L или OK Autrod 347Si ^S
			OK Autrod 309LSi ^L или OK Autrod 309Si
Ферритные нержавеющие стали			

- I применять в первую очередь
- II применять во вторую очередь
- III применять в третью очередь
- IV применять в четвертую очередь

^L – с низким содержанием углерода
^S – легированы карбидостабилизаторами

11. Прочитайте это перед тем как варить сплавы на Ni-основе!

Большинство сплавов на Ni-основе относятся к относительно хорошо свариваемым материалам, правда, надо учитывать некоторые нюансы:

- Термин «сплавы на Ni-основе» объединяет в себе линейку материалов, отличающихся друг от друга в очень широких пределах по химическому составу и механическим свойствам. По этой причине невозможно сформулировать универсальные рекомендации по их сварке, которые бы полностью подходили для любого из сплавов. Однако соблюдение нижеприведенных рекомендаций поможет избежать большинства элементарных ошибок.

- Чистый никель, «Монель», «Инконель», «Хастеллой» являются достаточно хорошо свариваемыми материалами. Другие сплавы, такие как «Инкойл», «Брайтрей», «Найло», а особенно «Нимоник» и «Нимокаст», настолько различны, даже в рамках своей группы, что очень трудно дать какие либо общие рекомендаций по их сварке с другими материалами. Поэтому перед сваркой этих материалов надо консультироваться с соответствующими их производителями. Это важно также делать из-за того, что за последние десятилетия произошли изменения в названиях многих марок этих сплавов, что может вызвать некоторую путаницу. Среди них особенно много высокопрочных сплавов, которые являются несвариваемыми или сплавами с ограниченной свариваемостью. В отношении свариваемости этих сплавов существует следующая зависимость: чем выше прочность сплава, тем хуже его свариваемость.

Рекомендуемые процессы сварки некоторых наиболее распространенных сплавов группы «Нимоник»

Подгруппа	Типичный предел прочности [МПа] (Состояние поставки: закалка или отпуск + старение)	Рекомендуемые процессы сварки (Варить идентичным присадочным материалом)
75 PE 13 PE 16	≤850	до толщины 12 мм: MMA, GTAW, GMAW
86	≤870	GTAW, GMAW
80/A 90	≤900	толщина ≤~5 мм *) GTAW, GMAW
81	~900	толщина ≤~5 мм *)
101 105 120	≥1150	не рекомендуется

*) При сварке больших толщин возникают проблемы с трещинами по ЗТВ

Для большинства разнородных соединений металлов со сплавами «Нимоник» данные сварочные материалы следует рассматривать как временное решение. В качестве временного решения можно использовать ОК 92.26, ОК Autrod 19.85 или ОК Tigrod 19.85.

- Сплавы на основе никеля при кристаллизации очень чувствительны к образованию пор. Эта чувствительность снижается с ростом % легирующих элементов (чистый никель наиболее чувствителен). Для снижения вероятности пористости в Ni электроды или на основе сплавов Ni добавляют некоторый % Ti.
- Некоторые Ni сплавы, особенно Монели, чувствительны к образованию кристаллизационных трещин при разбавлении наплавленного металла чугуном (см. рис.7). Для снижения этого эффекта сварочный материал легируется 4-5% Mn. По этой же причине подобные электроды следует применять для сварки сплавов на Ni-основе со сплавами на основе Fe (см. рис.8).
- Сплавы на основе Ni особенно чувствительны к загрязнению металлической пылью, грязью, следами краски и т.п. Поэтому крайне важно при подготовке кромок к сварке тщательно их очищать.
- Сварка обычно выполняется без предварительного подогрева на постоянном токе обратной полярности (при GTAW вольфрамовым электродом полярность меняется напрямую). При GMAW-сварке необходимо осуществлять предварительную продувку защитным газом и 10...20-ти секундный обдув шва по окончании сварки, чтобы избежать образования пор при старте и окончании сварки. Сварочная ванна при сварке должна быть небольших размеров, а удельное тепловложение минимально.

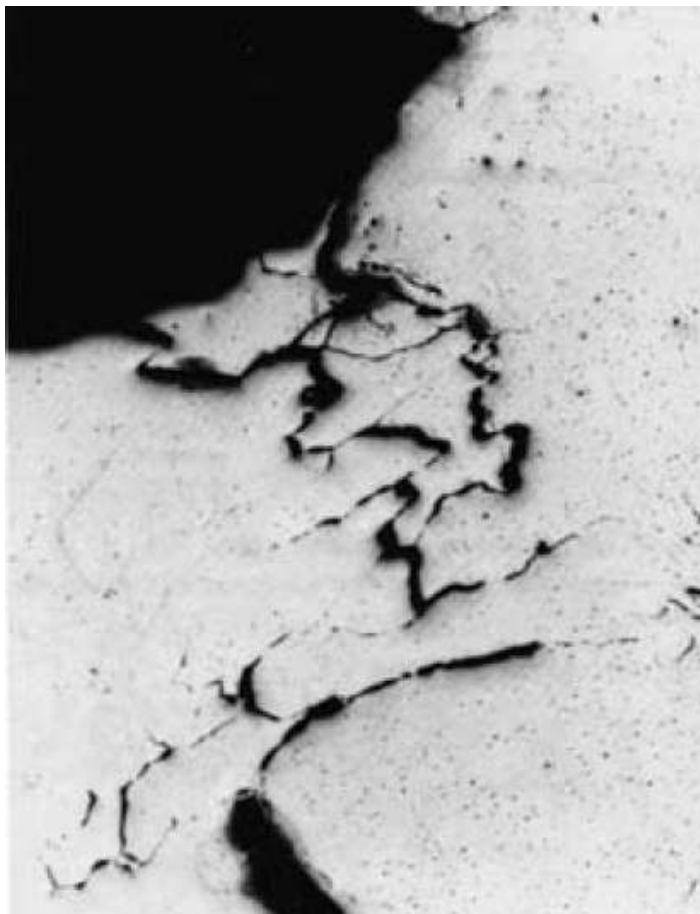


Рис.7 Трещина, вызванная растворением в наплавленном металле типа Монель с содержанием Mn около 1,3%, металла на основе Fe (увеличение 100х).

- Усадочные деформации, возникающие при кристаллизации и охлаждении у сплавов на основе Ni значительно выше, чем у сталей. Поэтому, для предотвращения образования трещин, следует избегать глубоких разделок и образования менисков на поверхности наплавленного металла.
- В случаях, когда коррозионная стойкость имеет значение, выбор сварочного материала должен быть согласован с поставщиком основного материала.



Рис.8 Наплавка электродами ESAB OK 92.26 выполнена на нелегированную сталь. В пограничной зона сплавления полностью отсутствуют дефекты типа трещин. Содержание Mn в наплавленном металле около 5% (увеличение 200х).

12. Чистый никель с черными сталями

Сварку можно выполнять присадочными материалами, как на основе чистого никеля, так и на основе никелевых сплавов. Вторые менее склонны к образованию пористости. Разбавление наплавленного металла некоторым количеством Fe не имеет серьезного значения.

Рекомендуемые сварочные материалы

MMA: OK 92.26
OK 92.05

GTAW: OK Tigrod 19.85

GMAW: OK Autrod 19.85

13. Чистый никель с нержавеющей стали

Для сварки данной комбинации можно применять присадочные материалы, как на основе чистого никеля, так и на основе никелевых сплавов.

Рекомендуемые сварочные материалы

MMA: OK 92.26

GTAW: OK Tigrod 19.85

GMAW: OK Autrod 19.85

14. Чистый никель с чугуном

Принцип подбора сварочных материалов для данной комбинации то же что и описан в главе 1.3.

Рекомендуемые сварочные материалы

	<i>Для наплавки переходного слоя на чугунную кромку</i>	<i>Для сварки с кромкой из чистого никеля</i>
MMA:	OK 92.18 OK 92.78	OK 92.86

15. Монель с углеродистыми и низколегированными сталями

Рекомендуемые сварочные материалы

MMA: OK 92.86
OK 92.26

GTAW: OK Tigrod 19.85

GMAW: OK Autrod 19.85

Долю участия основного металла стали в наплавленном слое необходимо держать на минимально возможном уровне.

16. Монель с инструментальными и пружинными сталями, а также сталями неизвестного химического состава

Наиболее надежно подобные соединения варить присадочными материалами на основе Ni сплава Инконель, однако можно применять и сварочные материалы на основе никелевых сплавов, легированных Mn, или Монеля.

Рекомендуемые сварочные материалы

MMA: OK 92.86
OK 92.26

GTAW: OK Tigrod 19.85

GMAW: OK Autrod 19.85

Долю участия основного металла стали в наплавленном слое необходимо держать на минимально возможном уровне.

17. Монель с высоколегированными нержавеющей стали

Наплавленный Монель-металл чувствителен к разбавлению в нем Fe, Cr и некоторых других элементов, а потому применение присадочных материалов на основе Инконель сплава является более предпочтительным, чем сварочные материалы на основе сплава Монель.

Рекомендуемые сварочные материалы

MMA: OK 92.26

GTAW: OK Tigrod 19.85

GMAW: OK Autrod 19.85

18. Монель с чугуном

Это наиболее простая для сварки комбинация, т.к. электроды на основе Монеля применяются для сварки чугунов. Бездефектный шов с применением электродов по чугуну или для никелевых сплавов на основе Монеля можно только при односторонней сварке, однако, технология сварки через буферный слой, описанная в главе 1.3, дает лучший результат.

Рекомендуемые сварочные материалы

	<i>Для наплавки переходного слоя на чугунную кромку</i>	<i>Для сварки с кромкой из никелевого сплава</i>
MMA:	OK 92.78 OK 92.18	OK 92.86

19. Монель с чистым никелем

Это относительно несложная комбинация. Можно применять сварочные материалы, как на основе чистого никеля, так и Монеля. Присадочные материалы на основе Монеля применяются чаще.

Рекомендуемые сварочные материалы

MMA: OK 92.86

20. Инконель со сталями

Рекомендуемые сварочные материалы

MMA:	OK 92.26
SAW:	OK Autrod 19.85/OK Flux 10.16
GTAW:	OK Tigrod 19.85
GMAW:	OK Autrod 19.85

Для сварки сплава Инконель 625 со сталью также можно применять электроды OK 92.45 (MMA).

21. Инконель или Нимоник с чугуном

Это достаточно редко встречающиеся (в меньшей степени для Нимоника) и иногда достаточно сложные для сварки комбинации (см. главы 1.3 и 11). На чугунную кромку должен быть наплавлен буферный слой электродом на Ni-основе

Рекомендуемые сварочные материалы

	<i>Для наплавки переходного слоя на чугунную кромку</i>	<i>Для сварки с кромкой из никелевого сплава</i>
MMA:	OK 92.60 OK 92.18 OK 92.78	OK 92.86
GMAW:		OK Autrod 19.85

22. Инконель с чистым никелем и Монелем

Рекомендуемые сварочные материалы

MMA:	OK 92.26
GTAW:	OK Tigrod 19.85
GMAW:	OK Autrod 19.85

23. Нимоник со сталями, чистым никелем, Монелем и Инколлом

Перед тем, как использовать нижеприведенные рекомендации, внимательно перечитайте главу 11 и обратите внимание на то, что данные рекомендации следует рассматривать только как временное решение.

Рекомендуемые сварочные материалы

MMA:	OK 92.26
GTAW:	OK Tigrod 19.85
GMAW:	OK Autrod 19.85

24. Хастеллой со сталями

Наиболее подходящими для решения данной задачи являются сварочные материалы на Ni-основе, однако можно использовать и некоторые присадочные материалы на основе высоколегированных сталей высокой степени легирования.

Рекомендуемые сварочные материалы

Хастеллой В или С со сталью:

MMA:	OK 92.35 OK 92.26 *) OK 68.82 OK 68.81
GTAW:	OK Tigrod 19.85
GMAW:	OK Autrod 19.85

*) При сварке Хастеллой со сталью, предпочтение следует отдавать OK 92.26

Следует ограничивать величину удельного тепловложения. На практике следует избегать перегрева сварочной кромки из Хастеллой. Чтобы избежать чрезмерного насыщения комки из Хастеллой железом, следует слегка повернуть дугу от этой кромки в сторону стальной.

25. Хастеллой с чугуном

Сварка данной комбинации необходимо выполнять по технологии сварки через буферный слой (см. главу 1.3). Переходный слой накладывается на чугунную кромку.

Рекомендуемые сварочные материалы

	<i>Для наплавки переходного слоя на чугунную кромку</i>	<i>Для сварки с кромкой из Хастеллой</i>
MMA:	OK 92.18 OK 92.60	OK 92.35 OK 92.26
GMAW:		OK Autrod 19.85

26. Хастеллой с чистым никелем и сплавами на Ni-основе

Предпочтительнее применять присадочные материалы, дающие в наплавке сплав типа Хастеллой, т.к. они меньше разбавляются металлом кромки из другого никелевого сплава. Также в качестве сварочного материала допускается применять Инконель-сплавы.

Рекомендуемые сварочные материалы

Хастеллой В или С со сталью:

MMA:	OK 92.35 OK 92.26
GTAW:	OK Tigrod 19.85
GMAW:	OK Autrod 19.85

Когда в комбинации этого разнородного соединения присутствует Хастеллой В, доля участия этого сплава в сварном шве должна быть сведена к минимуму, насколько это возможно.

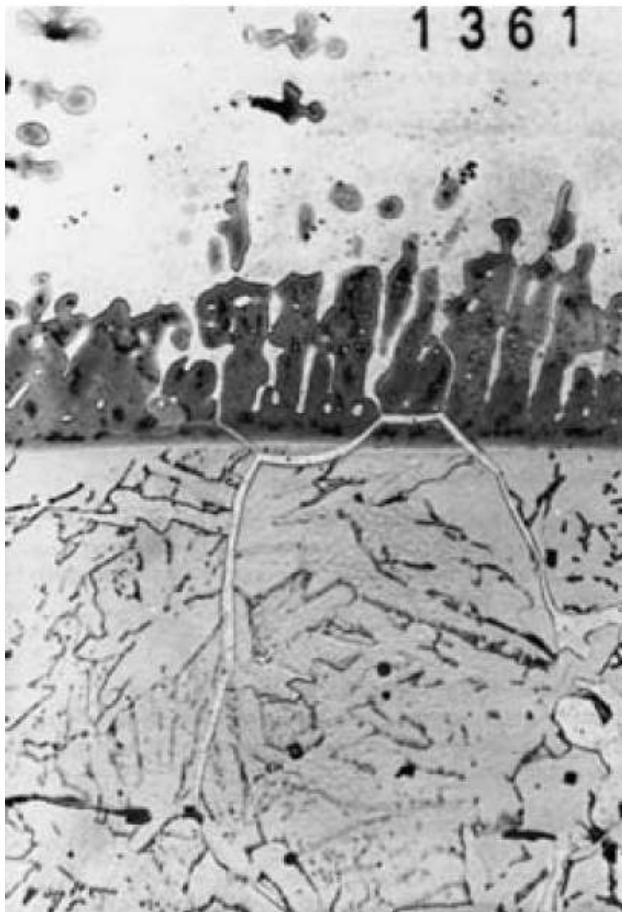


Рис.9 Проникновение бронзы в зону термического влияния стальной кромки при сварке электродами на основе бронзового сплава (увеличение 800х)

27. Прочитайте это перед тем как сваривать медь и ее сплавы со сталью и сплавами на Ni-основе

27.1. Чистая медь и бронзы

Расплавленная медь и, в несколько меньшей степени, бронза мигрируют в ЗТВ (Зону Термического Влияния) стальной кромки осаждаясь по границам зерен. Точка плавления этой фазы на несколько сот градусов ниже, чем температура плавления стали, а ее прочность не дотягивает и до половины прочности стали. Это проникновение происходит быстро, а глубина этой зоны может быть более 1 мм (см. рис.9). Растягивающие напряжения, возникающие при сварке, усиливают этот эффект. То же самое можно наблюдать и на никелевых сплавах, кроме чистого никеля и Монель-сплава. По этой причине чистый никель и Монель рекомендуется применять для наплавки переходных слоев, предотвращающих проникновение меди в другой металл. Однако данное проникновение меди не во всех случаях оказывает негативное воздействие на сварное соединение. Оно вполне допустимо во многих случаях при наплавке поверхностей. Однако, если сварное соединение подвержено воздействию высоких нагрузок и особенно повышенных температур, при которых происходит охрупчивание медной фазы по границам зерен, проникновение меди в пограничную зону необходимо исключить. При многопроходной сварке, когда при каждом последующем проходе повторяется термическое воздействие на уже наплавленный металл, процесс проникновения меди получает дополнительное ускорение, а также может произойти образование трещины вдоль линии сплавления. Поэтому при многопроходной сварке рекомендуется наплавлять никелевый или Монелевый переходный слой. Если в качестве переходного слоя используется чистый никель, его наплавляют на медную или бронзовую кромку. Монель-сплав наплавляется на немедную кромку. Для минимизации вредного воздействия от растворения в Монеле таких элементов как Fe и Cr, его дополнительно легируют Mn. При выполнении заполняющих проходов поверх переходного слоя, очень важно исключить физический контакт наплавляемого металла с материалом, находящимся под буферным слоем. Это наиболее важный момент, т.к. несоблюдение данного условия неминуемо приведет к образованию трещин (см. рис.10: «критические зоны»).

Когда переходный слой наплавляется на медную или бронзовую кромку, ее рекомендуется предварительно подогреть до 300-500°C. Изделие прогревается на всю толщину, однако, чтобы избежать излишнего разбавления наплавляемого слоя основным металлом, подогреть надо только стартовую зону сварки. Недостаточный прогрев может привести к нарушению баланса подводимого сварочной дугой тепла, что в свою очередь может вызвать нестабильность дуги и как следствие непровару, шлаковым включениям и т.п. Когда переходный слой наплавляется на немедную кромку, температура предварительного подогрева выбирается исходя из рекомендаций для данного материала. Когда переходный слой наплавлен на немедную кромку и в качестве сварочного материала для заполняющих слоев применяется электрод на основе медного сплава, медную кромку рекомендуется подогреть до 150-200°C (алюминиевые и оловянистые бронзы) и не более 100°C (кремниевые бронзы). Когда переходный слой наплавлен на медную кромку, выполнением заполняющих слоев предварительный подогрев этой кромки выполнять не требуется, т.к. наплавленный никелевый слой обладает значительно меньшей теплопроводностью по сравнению с медными сплавами и работает как теплоизолятор.

Бронзы резко теряют свои прочностные и пластические свойства в интервале температур 400-500°C. А потому крайне важно избегать жесткой фиксации свариваемых кромок или растягивающих напряжений, возникающих в бронзовой кромке под собственным весом изделия.

При сварке бронз, особенно с использованием бронзовых сварочных материалов, важно избегать низких скоростей сварки, чтобы минимизировать время нахождения критических зон сварного при этих неблагоприятных температурах. Это особенно важно для кремниевых бронз, в которых при ММА-сварке на скоростях менее ~20 см/мин могут образоваться трещины.

Когда для сварки со сталью используются электроды на основе алюминиевой бронзы, необходимо правильно подобрать параметры сварки так, чтобы гарантировать нормальное оплавление поверхности основного металла и исключить дефекты типа несплавления. Этого можно достичь за счет небольшого снижения скорости сварки.

Сварное соединение между алюминиевой бронзой с нержавеющей сталью:



	Наплавляемый переходный слой		Металл шва	Изменения в переходной зоне между буферным слоем и металлом шва	Стойкость к образованию трещин
	Бронзовая кромка	Стальная кромка			
1	Ni	—	Нерж. сталь 18Cr-12Ni-2,8Mo	Снижение %Ni	Плохая
	Ni	—	Ni-сплав 15Cr-10Fe-2Nb	Снижение %Ni	Хорошая
2	—	Ni	Алюмин. бронза 10Al-3Fe	Повышение %Cu	Плохая
	—	Ni + один слой Cu	Алюмин. бронза 10Al-3Fe	—	Отличная

Рис.10

27.2. Латуни

Из-за того, что цинк очень интенсивно испаряется, электродуговая сварка Cu-Zn сплавов не возможна. Концентрированный нагрев, характерный для дуговой сварки, вызывает чрезмерный нагрев сварочной ванны, который в свою очередь вызывает повышение парциального давления Zn выше 1 атм. (см. рис.11). Эти испарения вызывают образование пор с одной стороны, а с другой являются весьма вредными для здоровья сварщика. Потому для сварки латуней рекомендуется применять только ацетилено-кислородную сварку.

Однако встречаются и исключения. Наиболее характерным примером может служить сварка латуни легированной Al, которую можно варить GTAW-сваркой, используя в качестве присадочного материала пруток Cu-7%Al с обеспечением соответствующей газовой защиты зоны сварки в течение всего процесса и зачисткой перед сваркой поверхностей, как свариваемых кромок, так и присадочного материала (см. также гл. 31 и 36).

27.3. Медно-никелевые сплавы

Наиболее распространенными являются сплавы на Cu-основе, легированные 10, 20 или 30% Ni. Чаще всего эти материалы применяются в производстве теплообменников, холодильников и трубопроводов для морской воды. Наиболее часто используемый сплав с 30% Ni.

Данные сплавы становятся хрупкими при концентрации в них железа выше 10-12%, поэтому при разбавлении металла шва железом, долю участия основного металла надо сводить к минимуму. Практически для всех медно-никелевых сплавов, в комбинации со схожим с ними Монель-сплавом можно применять Монелевые электроды. Для сварки между собой медно-никелевых сплавов одинакового или различного химического состава чаще всего применяются медно-никелевые присадочные материалы с 30% Ni.

Сварка выполняется без предварительного подогрева на постоянном токе обратной полярности (GTAW-сварка на прямой полярности). Медно-никелевые сплавы, также как и сплавы на основе Ni, очень чувствительны к загрязнению (см. гл.11). Поэтому крайне важно чтобы перед сваркой свариваемые кромки были тщательно очищены.

27.4. Искусство сварки – Основные проблемы при сварке медных сплавов с другими металлами и сплавами.

Сварку данных сочетаний, особенно крупногабаритных конструкций, должен выполнять сварщик высокой квалификации. Если таких сварщиков в наличии нет, то перед началом работ необходимо провести им серьезный практический тренинг, либо необходимо передавать эти работы по субконтракту предприятиям, имеющим соответствующий опыт.

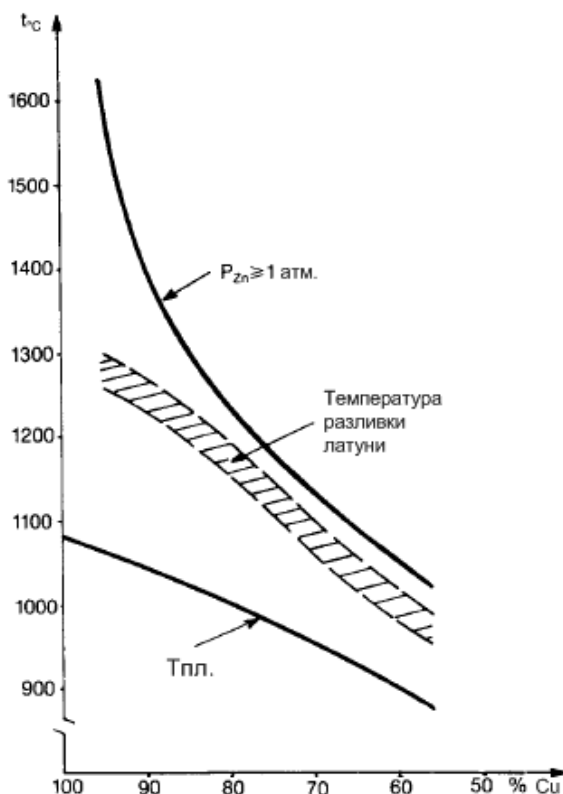


Рис.11. Влияние температуры на парциальное давление цинка в Cu-Zn сплавах

28. Чистая медь со сталью

(Читай также гл. 27.1)

Сварка выполняется через буферный слой. Этот переходный слой наплавляется на любую из кромок, медную или стальную. В любом случае это электрод, дающий в наплавке чистый никель. Для сварки лучше всего применять сварочные материалы на основе никелевого сплава Инконеля или бронзы, в зависимости от того, на какую из кромок наплавлен переходный слой.

Рекомендуемые сварочные материалы

Для наплавки переходного слоя:

MMA: OK 92.05

Для сварки с медной кромкой:

MMA: OK 94.55 (Cu-3%Si - сняты с производства)
OK 94.25

GMAW: OK Autrod 19.40
OK Autrod 19.20

Для сварки со стальной кромкой:

MMA: OK 92.26

GTAW: OK Tigrod 19.85

GMAW: OK Autrod 19.85

29. Чистая медь с чугуном

Для этой, достаточно редко встречающейся на практике комбинации, достаточно высокая концентрация в чугуне серы и фосфора может создать дополнительные проблемы при сварке из-за их возможного контакта с медью (прочие проблемы описаны в гл.1). Для данной комбинации буферный слой должен наплавляться исключительно на чугунную кромку.

Рекомендуемые сварочные материалы

Для наплавки переходного слоя на чугун:

MMA: OK 92.60

GTAW:

GMAW:

Для сварки с медной кромкой:

OK 94.55 (Cu-3%Si - сняты с производства)

OK Tigrod 19.40

OK Autrod 19.40

30. Чистая медь с никелем и его сплавами

В настоящее время нет полной объективной информации о чувствительности всех никелевых сплавов к проникновению меди по границами их зерен. Однако многие никелевые сплавы обладают чувствительностью к этому проникновению, особенно в случаях неблагоприятного температурного воздействия и напряженного состояния, поэтому рекомендуется применять относительно менее чувствительные к этому проникновению Монелиевые сварочные материалы. Последствием этого проникновения может быть образование горячих трещин по переходной зоне, которые в большей или меньшей степени могут заливаться эвтектическим медным сплавом. Необходимо учитывать, что прочность медной фазы будет ниже прочности самого сварного шва.

Для того чтобы избежать этих проблем, необходимо использовать технологию сварки через буферный слой. Этот переходный слой должен наплавляться на медную кромку. Для выполнения самого сварного шва необходимо использовать сварочный материал, схожий с материалом никелевой кромок.

Рекомендуемые сварочные материалы

Для наплавки переходного слоя на медную кромку:

MMA: ОК 92.05

Альтернативный вариант плакирования медной кромки (кроме случаев сварки с Хастелоем)

MMA: 1-й слой ОК 92.05
следующие слои ОК 92.86

Для сварки с чистым никелем:

MMA: ОК 92.05
ОК 92.86

GTAW: ОК Tigrod 19.85

GMAW: ОК Autrod 19.85

Для сварки с Монель-сплавом:

MMA: ОК 92.86

Для сварки с Инконелем или Нимоником:

MMA: ОК 92.26

GTAW: ОК Tigrod 19.85

GMAW: ОК Autrod 19.85

Для сварки с Хастелоем В или С:

MMA: ОК 92.26
ОК 92.45

GTAW: ОК Tigrod 19.85

GMAW: ОК Autrod 19.85
ОК Autrod 19.82

31. Латунь с Fe- и Ni-сплавами, чистой медью и медно-никелевыми сплавами

В соответствии с доводами, приведенными в гл.27.2, электродуговая сварка для данных комбинаций не рекомендуется. Однако в некоторых случаях можно использовать сварочные материалы на основе Al-бронзы или Sn-бронзы. Тем не менее, даже при соблюдении всех мер предосторожности в процессе сварки, в сварном шве могут образовываться хрупкие структуры. Кроме этого, еще имеют место описанные ранее проблемы с пористостью сварного шва и интоксикацией сварщиков. Поэтому для подобных задач предпочтительнее использовать ацетилено-кислородную сварку или пайку.

32. Sn-бронзы со сталью

Когда оловянистая бронза напрямую стыковым или угловым швом приваривается к стали, существует достаточно высокая вероятность получения дефектов типа несплавления. С другой стороны, из-за проникновения меди в стальную кромку (см. гл.27.1) происходит снижение прочностных характеристик сварного соединения. Этого можно избежать, если на стальную кромку наплавить бронзовый плакирующий слой, а затем выполнить сварку с бронзовой кромкой идентичным присадочным материалом. В случае, если проникновение меди в стальную кромку недопустимо, плакирующий слой наплавляется никелевым электродом не бронзовую кромку.

Рекомендуемые сварочные материалы

Для наплавки переходного слоя на стальную кромку с последующей сваркой с бронзовой кромкой:

MMA: ОК 94.25

GMAW: ОК Autrod 19.20

Для наплавки переходного слоя на бронзовую кромку:^{*) **)}

MMA: ОК 92.05

Для сварки со стальной кромкой:^{*)}

MMA: ОК 92.26

GMAW: ОК Autrod 19.85

^{*)} Данному варианту следует отдавать предпочтение, если материал стальной кромки – нержавеющая сталь!

^{**)} Использование для наплавки переходного слоя другого никелевого сплава, например Монеля или аналогичного сплава, адаптированного под сварку чугуна, в значительной степени повышает риск образования трещин.

Рекомендуемый угол разделки кромок составляет 90°, т.к. при более узкой разделке повышается риск получения несплавления из-за более высокой теплопроводности бронзы.

33. Бронзы с чугуном

Не смотря на то, что сварочные материалы на основе оловянистых бронз применяются при ремонтной сварке чугунных изделий, этими бронзовыми присадочными материалами не рекомендуется напрямую чугун сваривать с бронзой. Более безопасно наплавить плакирующие слои на обе кромки, а потом выполнять их сварку друг с другом.

Рекомендуемые сварочные материалы

Для наплавки переходного слоя на чугунную кромку:

MMA: ОК 92.18
ОК 92.78
ОК 92.60

Для наплавки переходного слоя на бронзовую кромку:

MMA: ОК 92.05

Для сварки:

MMA: ОК 92.86

Как и в главе 32, рекомендуемый угол раскрытия кромок разделки для данного сочетания материалов составляет 90°.

34. Бронзы с никелем и его сплавами

Данные комбинации лучше всего сваривать через буферные слои. Никелевый электрод следует применять для наплавки плакирующего слоя на бронзовую кромку. Наплавить нужную толщину никелевым электродом достаточно проблематично, поэтому первый слой наплавляется никелевым электродом, а последующие – Монелевым. Использование только Монелевого электрода для наплавки плакирующего слоя может привести к образованию трещин.

Рекомендуемые сварочные материалы

Для наплавки переходного слоя на бронзовую кромку:

MMA: ОК 92.05

Альтернативный вариант плакирования бронзовой кромки (кроме случаев сварки с Хастелоем)

MMA: 1-й слой ОК 92.05
следующие слои ОК 92.86

Для сварки с чистым никелем или Монель-сплавом:

MMA: ОК 92.05
ОК 92.86

GTAW: ОК Tigrod 19.85

GMAW: ОК Autrod 19.85

Для сварки с Инконелем или Нимоником:

MMA: OK 92.26
GTAW: OK Tigrod 19.85
GMAW: OK Autrod 19.85

Для сварки с Хастелоем В или С:

MMA: OK 92.26
OK 92.45
GTAW: OK Tigrod 19.85
OK Tigrod 19.82
GMAW: OK Autrod 19.85
OK Autrod 19.82

35. Бронзы с чистой медью

Для данной комбинации важно, чтобы в процессе сварки концентрация легирующих элементов в сварном шве не сильно падала из-за разбавления его чистой медью. (риск образования трещин повышается при снижении концентрации легирующих элементов). Использование в качестве присадочного материала Sn-бронз, Si-бронз и особенно Al-бронз позволяет достаточно хорошо противостоять этим дефектам.

Рекомендуемые сварочные материалы

Для Sn-бронзы с медью: Удовлетворительно

MMA: OK 94.25
OK 94.55 (Cu-3%Si - сняты с производства)

Для Al-бронзы с медью:

MMA: OK 94.55 (Cu-3%Si - сняты с производства)
GTAW: OK Tigrod 19.40
GMAW: OK Autrod 19.40

Для Si-бронзы с медью:

MMA: OK 94.65 (Cu-8%Al - сняты с производства)
OK 94.55 (Cu-3%Si - сняты с производства)
GTAW: OK Tigrod 19.30
GMAW: OK Autrod 19.30

36. Бронзы с латунью

Ацетилено-кислородная сварка является наиболее предпочтительным видом сварки для данной комбинации. Однако, если при дуговой сварке соблюдать осторожность (минимальное удельное тепловложение, избегать локальной концентрации энергии и т.п.), можно в большинстве случаев получить удовлетворительный результат. Как минимум он будет несколько лучше, чем при сварке чистого латунного стыка.

Рекомендуемые сварочные материалы

MMA: OK 94.55 (Cu-3%Si - сняты с производства)
GTAW: OK Tigrod 19.40
GMAW: OK Autrod 19.40

Также можно использовать присадочные материалы на основе Sn-бронзы, однако они более чувствительны к разбавлению латунью. И все же невозможно гарантировать абсолютно качественного результата при сварке данной комбинации, особенно если латунь относится к классу красных латуней, которые крайне не рекомендуется сваривать дуговыми способами сварки.

37. Al-бронзы или Si-бронзы со сталью

Если конструкции с подобными сочетаниями материалов эксплуатируются при незначительных статических нагрузках и невысоких температурах, для их сварки можно применять сварочные материалы на основе бронзы. На стальную кромку наплавляется бронзовый плакирующий слой, после чего ее сваривают с бронзовой кромкой, обычно используя однотипный с ней присадочный материал. Альтернативным вариантом является наплавки никелевого буферного слоя на бронзовую кромку.

Рекомендуемые сварочные материалы

Для сварки с неплакированной Ni кромки из Al-бронзы:

MMA: OK 94.55 (Cu-3%Si - сняты с производства)
GTAW: OK Tigrod 19.40
GMAW: OK Autrod 19.40

Для сварки с неплакированной Ni кромки из Si-бронзы:

MMA: OK 94.55 (Cu-3%Si - сняты с производства)
GMAW: OK Autrod 19.40

Для плакирования бронзовой кромки:

MMA: OK 92.05

Альтернативный вариант плакирования бронзовой кромки:

MMA: 1-й слой OK 92.05
следующие слои OK 92.86

Для сварки плакированной Ni кромки из Al- или Si-бронзы со сталью:

MMA: OK 92.86
OK 92.26
GTAW: OK Tigrod 19.85
GMAW: OK Autrod 19.85

38. Al-бронзы или Si-бронзы с Sn-бронзой

Для сварки данной комбинации можно принять большинство марок сварочных материалов на бронзовой основе. Сварочные материалы на основе Al-бронзы показывают наилучшую восприимчивость к разбавлению металла шва основными материалами, в то время как присадки из Sn-бронзы наиболее чувствительны к данному фактору.

Рекомендуемые сварочные материалы

MMA: OK 94.55 (Cu-3%Si - сняты с производства)
OK 94.25
GTAW: OK Tigrod 19.40
GMAW: OK Autrod 19.40
OK Autrod 19.20

39. Медно-никелевые сплавы со сталью

Для данной комбинации наиболее рекомендуемыми являются сварочные материалы на медно-никелевой основе типа 70%Cu+30%Ni. Сварочные материалы на основе Монель-сплава также можно применять.

Сварка медно-никелевых сплавов с нержавеющей сталью выполняется по технологии буферных слоев, либо через вставку (промежуточную деталь из ферритной стали или Монель-сплава) с последующей ее приваркой к одной и другой кромке. Для подбора сварочных материалов при сварке через промежуточную деталь следует руководствоваться рекомендациями из глав 6, 15 и 41. Для сварки медно-никелевой кромки со стальной промежуточной вставкой можно применять медно-никелевые или Монеливые присадочные материалы.

Рекомендуемые сварочные материалы

Для плакирования медно-никелевой кромки:

ММА: ОК 92.86
ОК 92.05

Для сварки с нержавеющей кромкой:

ММА: ОК 92.26
GMAW: ОК Autrod 19.85

Для сварки медно-никелевых трубок с трубными досками:

ММА: К торцу медно-никелевой трубки должна быть приварена промежуточная трубка: *)
Другой торец промежуточной трубки: ОК 92.86

Для сварки медно-никелевого сплава с черной сталью:

ММА: ОК 92.86
GMAW: ОК Autrod 19.40

*) Это соединение рекомендуется выполнять GTAW-сваркой с присадкой ОК Tigrod 19.40.

Следует ограничивать переход железа из стальной кромки в наплавленный металл. Сварку медно-никелевой трубки с трубной доской рекомендуется выполнять GTAW-сваркой. Достаточно часто эту сварку можно выполнять вообще без присадочного материала, оплавляя только свариваемые кромки деталей.

40. Медно-никелевые сплавы с чугуном

Эту, достаточно редко встречающуюся комбинацию рекомендуется варить через буферный слой.

Рекомендуемые сварочные материалы

Для наплавки переходного слоя на чугунную кромку: (см. гл.1.3)

ММА: ОК 92.78
ОК 92.18

Для сварки с медно-никелевой кромкой:

ММА: ОК 92.86

41. Медно-никелевые сплавы с чистым никелем или Монель-сплавом

Рекомендуемые сварочные материалы

ММА: ОК 92.86

42. Медно-никелевые сплавы с Инконелем или Нимоником

Сварку данной комбинации можно осуществлять напрямую используя сварочные материалы на основе Монель-сплава, однако безопаснее на медно-никелевую кромку наплавлять переходный слой Монелем, а затем их сваривать с присадочными материалами на основе Инконель-сплава. Это ограничит подмешивание Cr и Fe в Монель-сплав, и снизит потенциальную опасность образования трещин.

Рекомендуемые сварочные материалы

Для плакирования медно-никелевой кромки:

ММА: ОК 92.86

Для сварки с кромкой из Ni-сплава:

ММА: ОК 92.26
GTAW: ОК Tigrod 19.85
GMAW: ОК Autrod 19.85

43. Медно-никелевые сплавы с Хастелоем В или С

Принцип сварки тот же, что и в гл. 42, однако варить данное сочетание сложнее.

Рекомендуемые сварочные материалы

Для плакирования медно-никелевой кромки:

ММА: ОК 92.86

Для сварки с кромкой из Ni-сплава:

ММА: ОК 92.26
ОК 92.45
GTAW: ОК Tigrod 19.85
GMAW: ОК Autrod 19.85

44. Медно-никелевые сплавы с чистой медью

Наилучший результат для данного сочетания дают сварочные материалы на основе 70%Cu+30%Ni. Однако достаточно хорошие результаты получаются и при применении электродов на основе Sn-бронзы.

Рекомендуемые сварочные материалы

ММА: ОК 94.25
GMAW: ОК Autrod 19.20

45. Медно-никелевые сплавы с Sn-бронзой

Сварка данной комбинации осуществляется электродами на основе Sn-бронзы.

Рекомендуемые сварочные материалы

ММА: ОК 94.25
GMAW: ОК Autrod 19.20

46. Медно-никелевые сплавы с Al-бронзой или Si-бронзой

Комбинацию данных материалов можно встретить в судостроении. Для ее сварки надо использовать технологию буферных слоев. Сначала на медно-никелевую кромку наплавляют плакирующий слой Sn-бронзой, а затем сваривают с бронзовой кромкой сварочными материалами на основе Al или Si-бронзы.

Рекомендуемые сварочные материалы

Для наплавки плакирующего слоя на медно-никелевую кромку:	Для сварки с бронзовой кромкой:
MMA: ОК 94.25	ОК 94.65 (Cu-8%Al - сняты с производства) ОК 94.55 (Cu-3%Si - сняты с производства)
GTAW:	ОК Tigrod 19.40
GMAW:	ОК Autrod 19.40

47. Прочитайте это перед тем как сваривать алюминий и его сплавы

Большинство алюминиевых сплавов пригодны для сварки дугowymi способами сварки. Однако перед тем как приступить к сварке, необходимо проработать следующие аспекты:

- Водород – это элемент, оказывающий наибольшее влияние на результат при сварке алюминия. Даже очень его незначительная концентрация может вызвать образование пор в кристаллизующемся металле шва (рис. 12). При прокатке покрытых электродов с целью снижения содержания в них влаги и как следствие снижения вероятности образования пор, невозможно избежать образования трещин в их покрытии. Потому, при сварке покрытыми электродами, в сварном шве присутствуют распределенные по объему мелкие поры. Из-за этого механические свойства металла наплавленного покрытыми электродами, такие как прочность и пластичность, не регламентируются, однако их вполне можно применять, если к сварному шву предъявляются требования по герметичности. Сварку алюминия лучше всего выполнять GTAW или GMAW-сваркой.
- Кроме водорода, причиной образования пор могут также являться органические вещества, а потому свариваемые поверхности должны перед сваркой быть тщательно очищены.
- Некоторые алюминиевые сплавы недопустимо смешивать между собой из-за риска образования трещин. Потому, во избежание проблем при выборе присадочных материалов, следует придерживаться рекомендаций, данных в главе 50.
- MMA и GMAW-сварка как правило выполняется на постоянном токе обратной полярности (на электроде «+»). GTAW-сварка обычно выполняется на переменном токе. Во избежание образования пор при GTAW или GMAW-сварке, перед стартом и после гашения дуги рекомендуется в течение нескольких секунд осуществлять продувку защитного газа.
- Тонкостенные алюминиевые детали свариваются без предварительного подогрева. При толщинах более 6 мм или при сварке литья, температура предварительного подогрева может достигать 200°C.

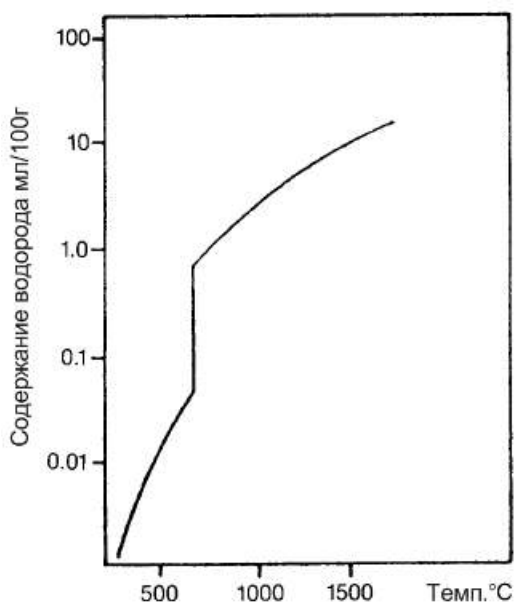


Рис. 12. Растворимость водорода в алюминии. Обратите внимание, что 100 г расплавленного алюминия могут поглотить около 1 мл водорода, в то время как в твердом состоянии в нем растворяется менее 0,1 мл. Для сравнения в 100 г стали растворяется 30 и 10 мл водорода соответственно.

48. Алюминий и его сплавы со сплавами на основе Fe и Ni

При попытке напрямую сварить данное сочетание дуговой сваркой плавлением, приемлемого результата добиться невозможно по следующим причинам:

- Слишком высокая разница в температурах плавления (>800°C). Это дополнительно усугубляется значительной разницей в удельной теплоемкости, скрытой теплоте плавления, коэффициенте термического расширения и т.п.
- Сочетание алюминия с железом обладает плохо смачиваемостью.
- Вступая в химическую реакцию, алюминий с железом образуют хрупкий интерметаллид $FeAl_3$. Соединение Al с Ni также приводит к образованию нежелательных интерметаллидных фаз.

Однако сваривать эти разнородные сплавы все же можно через промежуточные детали из биметалла или триметалла, именуемые «вставками», помещаемыми между алюминиевым и Ni- или Fe-сплавом. Двух- трехслойные материалы для этих вставок обычно изготавливаются сваркой взрывом. Во избежание проплавления сквозь эту вставку, толщина Fe/Ni части должна быть достаточной. Большая разница в температурах плавления этих сплавов компенсируется толщиной вставки. Для выполнения сварки следует подобрать соответствующие присадочные материалы (см. соответствующие главы справочника!). Механические свойства получаемого сварного соединения будут соответствовать механике алюминиевой детали.

Наилучший результат достигается при использовании GTAW-процесса для наплавки на стальную кромку плакирующего слоя из Al-бронзы (ОК Tigrod 19.40) с последующей приваркой к алюминиевой кромке MMA-способом электродами ОК 96.50 (Al+12%Si).

Под сварку с алюминием на стальную деталь также можно наносить гальваническим способом Ni, Zn или Cu (толщина покрытия около 50 мкм), но такой тонкий слой очень легко повредить.

49. Алюминий и его сплавы с медью и сплавами на медной основе

В сплавах на основе меди и алюминия могут образовываться очень хрупкие интерметаллиды ($CuAl_2$, $CuAl$, Cu_3Al_2), которые сильно осложняют сварку между этими сплавами.

Однако для решения задач сварки электрических шин из соответствующих материалов с получением низкого переходного сопротивления в стыке используют SAW или GTAW-сварку. SAW-сварку используют при сварке толщин от 12 до 20 мм. В качестве сварочных материалов используется богатый криолитом флюс в сочетании с Al проволокой. Продольная ось проволоки смещается на медную кромку на расстояние 0,5 от толщины медной пластины.

GTAW-процесс применяют для сварки лепестковых соединений деталей небольшой толщины, используя в качестве присадки алюминиевый пруток. Присадка подается в зону сварки так, чтобы обеспечить ее минимальное перемешивание с металлом медной кромок. Нанесение на медную кромку Ag, Sn, Zn и особенно Ni гальванического покрытия (толщиной около 50 мкм) позволяют улучшить смачиваемость этой кромок и тем самым улучшить результат сварки. И все же наилучший результат, особенно при сварке алюминия с бронзой, получается при использовании переходных вставок, применение которых описано в главе 48.

50. Разнородные алюминиевые сплавы друг с другом

Обычно, сварка алюминия и его сплавов, не представляет каких либо проблем. Однако существует ряд сплавов, сварка которых весьма затруднена.

Некоторые алюминиевые сплавы, особенно некоторые деформируемые сплавы, имеют склонность к образованию микротрещин при сварке. Смешивание металлов в сварном шве может также привести к образованию композиции, обладающей повышенной чувствительностью к образованию трещин. Для исключения этих нежелательных рисков, необходимо подсчитать вероятный химический состав сварного шва (это один из аспектов, связанных с рекомендациями по выбору присадочных материалов, приведенных далее в этой главе!). Чтобы произвести данный подсчет, необходимо базироваться на следующее:

Вид сварки	Защитный газ	Тип сварного соединения	Доля участия присадки в металле шва [%] *)
MMA	нет	горизонтальный	75
		угловой	70
		стыковой с разделкой	65
GMAW	Ar	стыковой без разделки	65
		горизонтальный	70
	75%He + 25%Ar	угловой	50
		горизонтальный	50
	Ar	стыковой с разделкой	60
		угловой	45
	75%He + 25%Ar	стыковой с разделкой	45
		стыковой без разделки	50
	Ar	стыковой с разделкой	45
		стыковой без разделки	40

*) Для GTAW-сварки эту долю можно принимать средней между MMA и GMAW

Исходя из нижеприведенной таблицы, можно оценить риск образования трещин в сварном шве:

Содержание элемента	Высокий риск [%]	Средний риск [%]	Малый риск [%]
Mg	-	1,5-3,5	<1,5 или >3,5
Si*	0,7-4,4	0,5-0,6 или 4,5-5,0	<0,5 или >5,0
Cu	0,7-4,3	0,4-0,6 или 4,4-5,0	<0,4 или >5,0
Zn	>6,0	4,5-6,0	<<4,5

AlMgZn-сплавы, содержащие Zn<3% и имеющие отношение Mg/Zn>1,5, не склонны к образованию трещин

* Если структура алюминиевого сплава не является двухфазной, влияние небольшого % кремния не учитывается

Если сварное соединение выбранной комбинации материалов еще не проходила испытаний, для оценки получаемых результатов, перед началом сварки изделия, рекомендуется провести испытания контрольного образца. В таблицах 4.1, 4.2 и 4.3 даны рекомендации по применяемому сварочным материалам для сварки однородных и разнородных комбинаций Al-сплавов.

51. Магний и его сплавы друг с другом и другими металлами

При контакте с атмосферой расплавленный магний очень легко воспламеняется. Он также активно поглощает водород и особенно азот. Именно нитриды определяют механические характеристики наплавленного металла. По этой причине сварку, как правило, выполняют в инертном газе GTAW-сваркой. В качестве присадки обычно применяют материалы, аналогичные по составу основному материалу. Обычно это полосы, нарезанные из соответствующего листа.

Прочностные характеристики наплавленного металла при комнатной температуре составляют менее 55% (в лучшем случае около 70%) от прочностных характеристик основного металла. Относительное удлинение находится в пределах от 20 до 65% для пластически деформированного и от 30 до 125% от удлинения литого основного металла, в зависимости от выбранного присадочного материала. Следует избегать сварки на слишком низких значениях тока, т.к. это может привести к образованию пористости. За некоторым исключением, литые детали перед сваркой следует подогревать до 250-300°C.

GTAW-сварку выполняют на постоянном токе как прямой, так и обратной полярности. При сварке на обратной полярности диаметр электрода следует подбирать таким, чтобы не происходил его

перегрев. При этом размеры сварочной ванны и ЗТВ получаются меньше.

Большинство магниевых сплавов не требуют послесварочной термообработки. Однако для сплавов, легированных более чем 1% Al, рекомендуется после сварки производить термическое снятие напряжений. Для литых изделий рекомендуется термообработку производить при 500°C в течение 1 часа, а для пластически деформированных при 200-250°C в течение 1 часа или при 300°C в течение 15 минут.

Дуговая сварка магниевых сплавов с другими металлами применяется крайне редко. Особенно трудно получить бездефектный шов, т.к. чрезмерное легирование Mg большинства сплавов приводит к образованию трещин. Это связано с тем, что крайне сложно удержать концентрацию Mg в сварном шве на уровне ниже 10% при непосредственной сварке магниевых сплавов с материалом на иной основе. Подобные сварные соединения рекомендуется выполнять через промежуточные вставки (см. гл.48).

52. Титан и его сплавы

Расплавленный титан очень активно поглощает газы из атмосферы воздуха. На практике содержание кислорода и азота в титане определяют его пластические свойства. По этой причине MMA-сварка для титана не применяется, т.к. атмосфера дуги не может надежно защитить сварочную ванну от этих газов. Любые утверждения о существовании сварочных материалов для MMA-сварки не следует воспринимать серьезно.

Приемлемый результат можно получить только GTAW- и GMAW-сваркой при использовании инертного газа в качестве защиты. Однако сварка данными способами требует использования специальных приспособлений, такие как горелка с дополнительной защитой хвостовой части сварочной ванны, система поддува корня шва защитным газом и т.п. Особенно важно обеспечить правильную газовую защиту и тщательно очистить зону сварки.

Существуют три типа Ti сплавов: α-, β-, и (α+β)-сплав. α-сплав можно сваривать с другим α-сплавом, β-сплав с другим β-сплавом, (α+β)-сплав считается несвариваемым, а потому сварного соединения α-сплава с β-сплавом следует избегать. Сварку титановых сплавов должен выполнять высококвалифицированный и опытный сварщик. Помещение, где выполняется сварка, должно отвечать соответствующим требованиям по чистоте. Под сварку титана в цеховых условиях необходимо выделять отдельный закрытый участок, где должны производиться все соответствующие работы.

53. Титан и его сплавы с другими металлами

Качественное сварное соединение можно получить, используя технологию сварки через промежуточные вставки (см. гл.48). Титановые сплавы удовлетворительно свариваются с алюминиевыми сплавами. При сварке нахлесточных соединений титановую пластину рекомендуется располагать сверху, а алюминиевую снизу. Сварочные параметры выставляются так, чтобы верхняя титановая пластина слегка подплавлялась (на глубину 0,3-0,4 мм), а нижняя алюминиевая плавилась как обычно. Естественно выполнить такую сварку достаточно сложно, чтобы не пережечь титановую пластину.

Таблица 4.1 Присадочные материалы для сварки деформируемых алюминиевых сплавов

Al Cu Mg ³		Al Zn Mg	Al Si5	Al Mg Si(Mn, Cu)	Al Mg3 (Mn) Al Mg4-5 (Mn)	Al Mg≤2 (Mn)	Al Mn (Mg)	Al
Al	I	T/A 4047 ²			T/A 4043	T/A 4043 ¹	T/A 1450	T/A 1450
	II	S 96.50 ²	T/A 4043	T/A 4043	T/A 5356/5183	T/A 5356/5183	T/A 4043	T/A 1070
	III	T/A 5356/5183					T/A 5356	S 96.10/96.20
	IV						T/A 1070	T/A 4043
Al Mn (Mg)	I	T/A 4047 ²	T/A 5356/5183		T/A 5356/5183	T/A 5356/5183	T/A 4043	T/A 4043
	II	S 96.50 ²	T/A 4043	T/A 4043	T/A 4043	T/A 4043	T/A 1450	T/A 1450
	III	T/A 5356/5183				T/A 5754	T/A 5356/5183	T/A 5356/5183
	IV						T/A 1070	T/A 1070
Al Mg≤2 (Mn)	I	T/A 4047 ²	T/A 5356/5183	T/A 4043	T/A 4043	T/A 5356/5183	T/A 5356/5183	
	II	S 96.50 ²	T/A 4043	T/A 5356/5183	T/A 5356/5183	T/A 4043 ¹	T/A 4043 ¹	
	III	T/A 5356/5183			T/A 5754	T/A 5754	T/A 5754	
	IV						T/A 1070	
Al Mg3 (Mn) Al Mg4-5 (Mn)	I	T/A 5356/5183	T/A 5356/5183	T/A 5356/5183	T/A 5356/5183	T/A 5356/5183		
	II			T/A 4043	T/A 4043	T/A 5754		
	III				T/A 5754			
Al Mg Si (Mn, Cu)	I	T/A 4047 ²	T/A 4043		T/A 4043			
	II	S 96.50 ²	T/A 5356/5183	T/A 4043	T/A 5356/5183			
	III	T/A 5356/5183	T/A 5754		T/A 5754			
Al Si5	I	T/A 4047 ²	T/A 5356/5183					
	II	S 96.50 ²	T/A 4043 ¹	T/A 4043				
Al Zn Mg	I	T/A 4047 ²	T/A 5356/5183					
	II	S 96.50 ²	T/A 4043					
Al Cu Mg ³	I	T/A 4047 ²						
	II	S 96.50 ²						
	III	T/A 5356/5183						

¹⁾ Менее применим, когда требуется коррозионная стойкость или изделие анодируется
²⁾ Наплавленный металл имеет структуру аналогичную литому материалу
³⁾ Данный сплав относиться к типу тяжело свариваемых

A: OK Autrod XXXX (GMAW)
S: OK XX.XX (MMA)
T: OK Tigrod XXXX (GTAW)

I применять в первую очередь
II применять во вторую очередь
III применять в третью очередь
IV применять в четвертую очередь

Таблица 4.2

Присадочные материалы для сварки литейных алюминиевых сплавов

		Al Zn Mg	Al Cu5-10	Al Mg3 (Si, Mn) Al Mg4-5 (Si)	Al Si≤8 Cu≤5	Al Si5-8 (Mg)	Al Si9-12
Al Si9-12	I	T/A 4043	T/A 4047	T/A 5356/5183	T/A 4047	T/A 4043	T/A 4047
	II	T/A 4047	S 96.50	T/A 4043	S 96.50	T/A 4047	S 96.50
	III	S 96.50	T/A 4043	T/A 4047	T/A 4043	S 96.50	T/A 4043
	IV			S 96.50			
Al Si5-8 (Mg)	I	T/A 5356/5183	T/A 4047	T/A 5356/5183	T/A 4047	T/A 4043	
	II	T/A 4043	S 96.50	T/A 4043	S 96.50	T/A 4047	
	III	T/A 4047		T/A 4047	T/A 4043	S 96.50	
	IV	S 96.50		S 96.50			
Al Si≤8 Cu≤5	I	T/A 4047	T/A 4047	T/A 4047	T/A 4047		
	II	S 96.50	S 96.50	S 96.50	S 96.50		
	III			T/A 4043	T/A 4043		
Al Mg3 (Si, Mn) Al Mg4-5 (Si)	I	T/A 5356/5183	T/A 4047	T/A 5356/5183			
	II	T/A 4047	S 96.50	T/A 5754			
	III	S 96.50					
Al Cu5-10	I	T/A 4047	T/A 4047				
	II	S 96.50	S 96.50				
Al Zn Mg	I	T/A 5356/5183					
	II	T/A 4043					
	III	T/A 4047					
	IV	S 96.50					

A: OK Autrod XXXX (GMAW)

S: OK XX.XX (MMA)

T: OK Tigrod XXXX (GTAW)

I применять в первую очередь

II применять во вторую очередь

III применять в третью очередь

IV применять в четвертую очередь

Таблица 4.3

Присадочные материалы для сварки литейных алюминиевых сплавов с деформируемыми

Литейный Деформируемый		Al Zn Mg	Al Cu5-10	Al Mg3 (Si, Mn) Al Mg4-5 (Si)	Al Si≤8 Cu≤5	Al Si5-8 (Mg)	Al Si9-12
Al	I	T/A 4043	T/A 4047	T/A 4043	T/A 4047	T/A 4043	T/A 4043
	II		S 96.50	T/A 5356/5183	S 96.50	T/A 4047	T/A 4047
	III				T/A 4043	S 96.50	S 96.50
Al Mn (Mg)	I	T/A 5356/5183	T/A 4047	T/A 5356/5183	T/A 4047	T/A 4043	T/A 4043
	II	T/A 4043	S 96.50	T/A 4043	S 96.50		T/A 4047
	III						S 96.50
Al Mg≤2 (Mn)	I	T/A 5356/5183	T/A 4047	T/A 5356/5183	T/A 4047	T/A 4043	T/A 4043
	II	T/A 4043	S 96.50	T/A 4043	S 96.50	T/A 5356/5183	T/A 4047
	III				T/A 4043		S 96.50
Al Mg3 (Mn) Al Mg4-5 (Mn)	I	T/A 5356/5183	T/A 4047	T/A 5356/5183	T/A 4047	T/A 5356/5183	T/A 4043
	II	T/A 4047	S 96.50	T/A 5754	S 96.50	T/A 4043	T/A 4047
	III	S 96.50			T/A 4043	T/A 4047	S 96.50
	IV					S 96.50	
Al Mg Si (Mn, Cu)	I	T/A 4043	T/A 4047	T/A 5356/5183	T/A 4047	T/A 4043	T/A 4047
	II	T/A 5356/5183	S 96.50	T/A 4043	S 96.50	T/A 4047	S 96.50
	III					S 96.50	T/A 4043
Al Si5	I	T/A 5356/5183	T/A 4047	T/A 5356/5183	T/A 4047	T/A 4043	T/A 4043
	II	T/A 4043	S 96.50	T/A 4043	S 96.50	T/A 4047	T/A 4047
	III	T/A 4047		T/A 4047	T/A 4043	S 96.50	S 96.50
	IV	S 96.50		S 96.50			
Al Zn Mg	I	T/A 5356/5183	T/A 4047	T/A 5356/5183	T/A 4047	T/A 5356/5183	T/A 4047
	II	T/A 4043	S 96.50	T/A 4047	S 96.50	T/A 4043	S 96.50
	III	T/A 4047		S 96.50		T/A 4047	
	IV	S 96.50				S 96.50	
Al Cu Mg ¹	I	T/A 4047	T/A 4047	T/A 5356/5183	T/A 4047	T/A 4047	T/A 4047
	II	S 96.50	S 96.50	T/A 4043	S 96.50	S 96.50	S 96.50

¹⁾ Данный сплав относится к типу тяжело свариваемых

I применять в первую очередь
 II применять во вторую очередь
 III применять в третью очередь
 IV применять в четвертую очередь

A: OK Autrod XXXX (GMAW)
 S: OK XX.XX (MMA)
 T: OK Tigrod XXXX (GTAW)

54. Кобальтовые сплавы с другими металлами

На практике сварка кобальтовых сплавов с другими металлами встречается достаточно редко, а потому в этой главе освещаются только вопросы сварки кобальтовых сплавов с железными и никелевыми сплавами.

Внимание. В настоящее время компания ESAB не производит сварочных материалов на кобальтовой основе.

Кобальтовые сплавы со сталями:

Помимо обычной технологии соединения данной комбинации методом пайки, положительные результаты также можно получить электродуговой плавкой, используя специальные пластичные электроды на кобальтовой основе с низким содержанием углерода типа ОК 93.07. Наплавленный металл должен быть идентичен по составу кобальтовому сплаву. В некоторых случаях для данной комбинации также можно применять электроды ОК 93.06. Разбавление металла сварного шва железом приводит к снижению твердости наплавленного металла, что позволяет снизить риск образования трещин. Поэтому надо стремиться к большей доле участия стальной кромок в металле шва.

Обе кромок, как кобальтовую, так и стальную, перед сваркой рекомендуется подогревать до 350–400°C.

Рекомендуемые сварочные материалы

MMA: ОК 93.07 – (сняты с производства)
ОК 93.06 – (сняты с производства)

Кобальтовые сплавы со сплавами на никелевой основе:

Данная комбинация обычно соединяется методом пайки. Однако можно применять и MMA-сварку электродами ОК 93.07. Также в некоторых случаях можно применять электроды ОК 93.06, т.к. Ni, также как и Fe, разбавляя собой наплавленный металл снижает твердость кобальтового сплава, а соответственно и риск образования трещин.

По теории сплавы на Ni-основе чувствительны к излишнему нагреву, поэтому температура предварительного подогрева никелевой кромок не должна превышать 200°C. Кобальтовую кромку перед сваркой рекомендуется подогревать до 350–400°C.

Рекомендуемые сварочные материалы

MMA: ОК 93.07 – (сняты с производства)
ОК 93.06 – (сняты с производства)

55. Сочетание материалов, не включенных в ключ-таблицу (см. стр.2)

Аустенитные марганцовистые стали с другими сталями:

Аустенитные марганцовистые стали достаточно часто применяются в конструкциях, подвергающихся в процессе эксплуатации повышенному износу, особенно ударным нагрузкам, типичным примером которых могут служить дробилки землечерпалки и т.п. Очень часто на практике эти стали приходится сваривать с обычными сталями. Использовать для сварки присадочные материалы на основе аустенитных марганцовистых сталей не рекомендуется, за исключением материалов, легированных ~3% Ni, т.к. разбавление металла шва железом может привести к образованию очень грубого зерна и, склонной к образованию трещин, мартенситной структуры. Чаще всего для сварки этих композиций применяют сварочные материалы на основе аустенитных нержавеющих сталей (18%Cr-8%Ni-6%Mn или 19%Cr-10%Ni-3%Mo или 23%Cr-13%Ni-2%Mo).

Рекомендуемые сварочные материалы

MMA: ОК 67.45
ОК 62.73 или 62.75
ОК 67.70

GMAW: ОК Autrod 16.95
ОК Autrod 309MoL

Сварка выполняется без предварительного подогрева и с ограничением удельного тепловложения. Излишне высокое тепловложение может вызвать выпадение карбидов и тем самым испортить микроструктуру марганцовистой стали.

5 и 9% Ni-стали с другими сталями:

Стали, легированные 5 или 9% Ni обычно применяются в производстве конструкций криогенного назначения (работающих при очень низких температурах – до -196°C). При сварке этих сталей сварочными материалами на Ni-основе или специальными высоколегированными нержавеющими электродами, обычно не возникает ни каких проблем. Применение присадочных материалов идентичного этим сталям химического состава может привести к образованию трещин.

Рекомендуемые сварочные материалы

MMA: ОК 92.55
ОК 92.26

GMAW: ОК Autrod 19.85

Цинк и его сплавы:

Данные материалы обычно варят автогенной ацетиленокислородной сваркой.

Тем не менее приемлемого результата можно добиться и GTAW-сваркой, используя в качестве присадки алюминиевый пруток. Параметры сварки и движения горелки/присадки должны быть четко отработаны, чтобы избежать закипания сварочной ванны.

Ферритные нержавеющие ELI-стали (Extra Low Interstitials – максимально однофазная структура)

Это хромистые стали с пониженным содержанием углерода и азота, превосходящие по своим свойствам аналогичные Cr-стали, особенно по пластичности. Однако, сохранить эти свойства при сварке неизменными не представляется возможным. На практике эта пластичность резко снижается по ЗТВ (Зоне Термического Влияния) из-за роста зерна. Предотвратить этот рост зерна практически невозможно, однако его можно минимизировать. Поэтому сварку следует выполнять электродами меньшего, чем обычно диаметра, без поперечных колебаний и максимально возможной скорости сварки.

Наплавленный металл одностипного химического состава также будет иметь неблагоприятную микроструктуру, и вдобавок ко всему его прочностные свойства будут уступать основному металлу. Поэтому для сварки необходимо использовать присадочные материалы отличные по своему составу от основного металла. Наилучшие результаты получаются при использовании сварочных материалов на Ni-основе или на основе нержавеющих сталей повышенного легирования.

Рекомендуемые сварочные материалы

MMA: ОК 92.26
ОК 67.70

GMAW: ОК Autrod 19.85
ОК Autrod 309MoL

GTAW: ОК Tigrod 19.85
ОК Tigrod 309MoL