

А. А. Безруких, Р. А. Мейстер, М. А. Лубнин, С. А. Готовко

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НАПЛАВКИ РАЗЛИЧНЫМИ СПОСОБАМИ ПЛАВЯЩИМИСЯ ЭЛЕКТРОДАМИ ДЛЯ СВАРКИ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ

Приведены результаты сравнительного металлографического анализа наплавки различными способами покрытыми электродами аустенитного класса для сварки нержавеющей сталей. Показаны преимущества высокоэффективного процесса наплавки независимой трехфазной дугой.

Ключевые слова: наплавка, аустенит, независимая трехфазная дуга, плавящиеся электроды.

Объекты аэрокосмической техники оснащаются, исходя из требований эксплуатации, узлами и деталями с повышенной жаростойкостью и жаропрочностью, износоустойчивостью, коррозионной стойкостью и т. д., что требует дорогостоящих материалов. В данном случае экономичным является применение высокоэффективных наплавочных процессов независимой трехфазной дугой высоколегированными стальными электродами.

Наплавка, как и сварка, связана с нагревом металлов в широком интервале температур и последующим охлаждением нагретых зон с разными скоростями. Это приводит к сложным структурным и фазовым изменениям, имеющим определяющее значение для указанных выше свойств. Наплавленный металл образуется при кристаллизации жидкого электродного и оплавленного основного металла, приобретая литое строение. Оно зависит от условий плавления и кристаллизации расплавленного металла при наплавочном цикле, от химического состава и типа диаграммы состояния данного сплава, от диффузионных процессов в жидком и твердом состоянии, от структурных и фазовых превращений при охлаждении в твердом состоянии, а также от напряжений и деформаций [1].

Характер участка сплавления валика с основой имеет большое значение для свойств и работоспособности наплавки, особенно из разнородных металлов и различных по составу и структурному классу сталей. Он определяет надежность связи наплавленного металла с основным. Основным металлом обычно является низко- или среднеуглеродистая сталь, а наплавленным – высокоуглеродистый, высоколегированный сплав. Строение и свойства участка сплавления этих двух материалов будут зависеть от степени проплавления, характера промежуточных сплавов и диффузии углерода в приграничных участках. Структурное состояние участка сплавления, а следовательно, и его свойства зависят также от диффузии углерода из наплавленного металла в основной и наоборот.

При наплавке на низкоуглеродистую сталь (0,2 % С), в зависимости от состава наплавляемого металла, в зоне сплавления могут получаться структуры с преобладающим количеством мартенсита или аустенита, в зависимости от содержания углерода (рис. 1).

Качество наплавки определяется комплексом механических и специальных свойств, являющихся, как правило, структурно чувствительными характеристиками. Оценка строения и структуры позволяет характеризовать качество и свойства материала, а также управлять структурными и фазовыми превращениями, регулируя параметры технологического процесса. Эта задача решается

с помощью методов металловедения с учетом специфических особенностей, характерных для сварных соединений и наплавки. Они связаны с тем, что соответствующие структурные превращения протекают в неравновесных условиях, а температура нагрева значительно выше, чем, например, при термической обработке. Резко отличаются при этом и условия кристаллизации, определяемые характером тепловых полей и малыми объемами зоны расплавления в сравнении с литейными процессами [2].

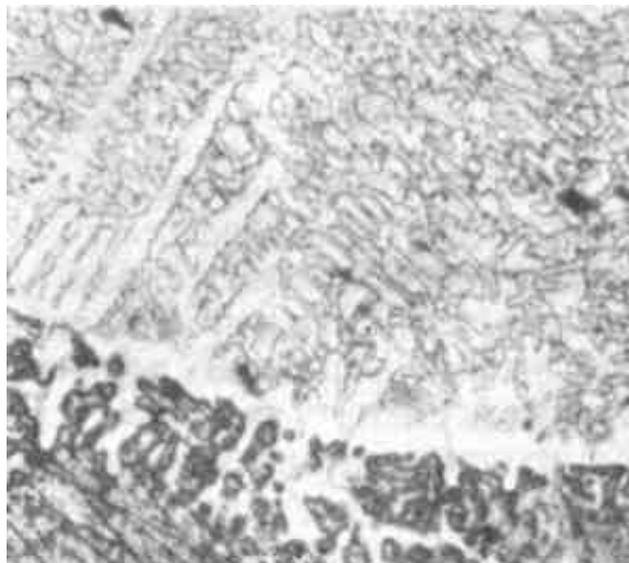


Рис. 1. Микроструктура участка сплавления основного металла стали 20 с наплавленным типа 05X2M, $\times 550$ [1]

Важнейшими легирующими элементами высоколегированных сталей являются хром, никель и марганец. Марганец и никель снижают температуру γ - α -превращения, вследствие чего при относительно больших их содержаниях в сталях аустенитная структура стабильна при нормальных (комнатных) температурах. Лучшие свойства имеют аустенитные стали, содержащие как хром, так и никель. Они не склонны к росту зерна, а α -фаза образуется в аустените значительно медленнее, чем в феррите из-за меньших скоростей диффузии.

В металле, наплавленном аустенитными материалами, как правило, вторичная кристаллизация не происходит из-за высокой стабильности аустенита, а в процессе дальнейшего охлаждения после затвердевания фиксируется структура первичной кристаллизации. В зависимости от содержания хрома и никеля, сталь может иметь аустенитную или аустенитно-ферритную структуру. При

недостаточном содержании никеля и хрома металл наплавки может иметь вторичную аустенитно-мартенситную структуру [3]. Фазовый состав наплавленного металла определяется с помощью диаграммы Шеффлера.

На свойства металла наплавки и на образующуюся структуру наплавленного слоя большое влияние оказывает перемешивание основного и присадочного металлов. Обычно стремятся к небольшому перемешиванию наплавленного металла с основным.

При наплавке многих высоколегированных сплавов в переходе от наплавленного металла к основному образуется бесструктурная узкая зона, называемая также белой зоной. Эта низкоуглеродистая светлая, легированная, узкая переходная зона, имеющая мелкую структуру, должна представлять собой нетравящийся мартенсит или никель-железный твердый раствор. При наплавке нержавеющей сталей на нелегированную сталь образуется резко выраженная переходная зона между наплавленным и основным металлом достаточно большой ширины.

В данной работе проведено исследование наплавки тремя способами плавящимися электродами для сварки нержавеющей и жаростойких сталей марки ОК61. 30 Ø2,5. Ниже приведена их характеристика (табл. 1), химический состав и механические свойства наплавленного материала (табл. 2) и режимы наплавки (табл. 3).

Электрод ОК61. 30 со сверхнизким содержанием углерода является универсальным для сварки нержавеющей сталей. Он легко зажигается (в том числе и повторно), дает хорошее формирование валика, шлак самоотделяется. Материал электрода обеспечивает стойкость против межкристаллитной коррозии.

Из образцов наплавки электродами ОК61. 30 / E308L-17n Ø2,5 изготовлены шлифы для выявления характера микроструктуры электротравлением в щавелевой кислоте. Металлографические исследования проводились под микроскопами МБС-10 и МЕТАМ ЛВ-31. Снимки макро- и микроструктур приведены на рис. 2.

Валик обычной наплавки одним электродом (рис. 2, а) характеризуется значительной степенью проплавления в основной металл, малой высотой и шириной, резко выраженной границей в переходной зоне. Микроструктура середины валика наплавки в поперечном сечении имеет монослойное аустенитное строение (рис. 2, з). Очевидна пористость. Линия сплавления волнистая, четкая. В сечении можно выделить переходную зону с прослойками однородного белого металла у линии сплавления (вероятно – никеля). Основной металл перетравлен. Периферийная зона (рис. 2, ж) иллюстрирует глубокое проплавление.

Валик, наплавленный расщепленным электродом (рис. 2, б) характеризуется пониженной степенью проплавления в основной металл, средней высотой и шириной, резко выраженной границей в переходной зоне. Микроструктура середины валика наплавки в поперечном сечении имеет слоистое аустенитное строение (рис. 2, д). Пористость – незначительная. Линия сплавления относительно ровная, четкая. Хорошо видна переходная зона с однородной белой прослойкой у линии сплавления. Основной металл перетравлен. Периферийная зона (рис. 2, з) иллюстрирует проплавление средней глубины.

Валик, наплавленный независимой дугой тремя электродами [4] (рис. 2, в), характеризуется: минимальным

Таблица 1

Характеристика электродов

Параметр	Описание
Марка электрода	ОК61. 30
Тип электрода (международное обозначение)	Э-02Х20Н10Г2 / ГОСТ 10052-75 (E308L-17n / AWS 5.4-92; E19 9LR12 / EN 1600)
Тип покрытия	рутиловый
Свариваемые стали	03Х18Н11, 12Х18Н10Т, 06Х18Н11, 08Х18Н10, 08Х18Н10Т, 304 и т. п.
Жаростойкость, °С	до 875
Ток	= + / ~
$U_{х.х.}$, В	55
Положение	1, 2, 3, 4, 6

Таблица 2

Химический состав и механические свойства металла, наплавленного электродами ОК61. 30

Химический состав					Механические свойства				
C	Si	Mn	Cr	Ni	Предел текучести	Предел прочности	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость KV при +20° С, Дж	Ферритное число, FN
0,03	0,8	0,8	19,5	10,0	420	570	45	70	3...10

Таблица 3

Режимы наплавки образцов электродами ОК61. 30 Ø2,5

Наплавка	Ток I, А	Напряжение на дуге U, В	Напряжение холостого хода $U_{х.х.}$, В
Обычная одним электродом	80	25...30	72
Расщепленным электродом	80	25...28	98
Трехфазная независимой дугой тремя электродами	66	32...35	72

проплавлением в основной металл; значительной полнотой сечения с максимальной высотой и шириной в сравнении с наплавками другими способами; углами схождения поверхностей основного и наплавленного металла, близкими к 90° ; резко выраженной границей в переходной зоне; слоистостью. Микроструктура середины валика наплавки имеет слоистое аустенитное строение (рис. 2, *е*). Пористость – незначительная. Линия сплавления ровная, четкая. Переходная зона представлена однородной прослойкой у линии сплавления (вероятно – никеля) с гребнями, вдающимися в наплавленный металл. Основной металл перетравлен. Периферийная зона (рис. 2, *и*) иллюстрирует минимальную глубину проплавления. Шлаковое включение слева в угловой зоне линии сплавления является следствием образования пазухи из-за характерной формы поперечного сечения валика с углом схождения поверхностей металла $<90^\circ$. Поэтому необходима тщательная зачистка таких пазух перед наплавкой соседних валиков.

Во всех случаях очевиден резкий переход между наплавленным и основным металлом вследствие разности химического состава, а структура наплавленного металла имеет аустенитное строение. Аустенитный характер наплавленного металла благоприятен для придания рабочим поверхностям специфических эксплуатационных свойств. Наблюдаются прослойки белого металла у линии сплавления, описанные выше. Это особенно выражено при наплавке трехфазной независимой дугой. При трехэлектродных способах наплавленный металл имеет слоистое строение. Пористость минимальна при наплавке трехфазной независимой дугой. Данный процесс дает наименьшую из всех способов глубину проплавления в основной металл. Следовательно, применение независимой трехфазной дуги обеспечивает получение наплавленного металла без смешивания с материалом основы в первом–втором слое. Полнота сечения наплавки говорит о высокой эффективности процесса [4].

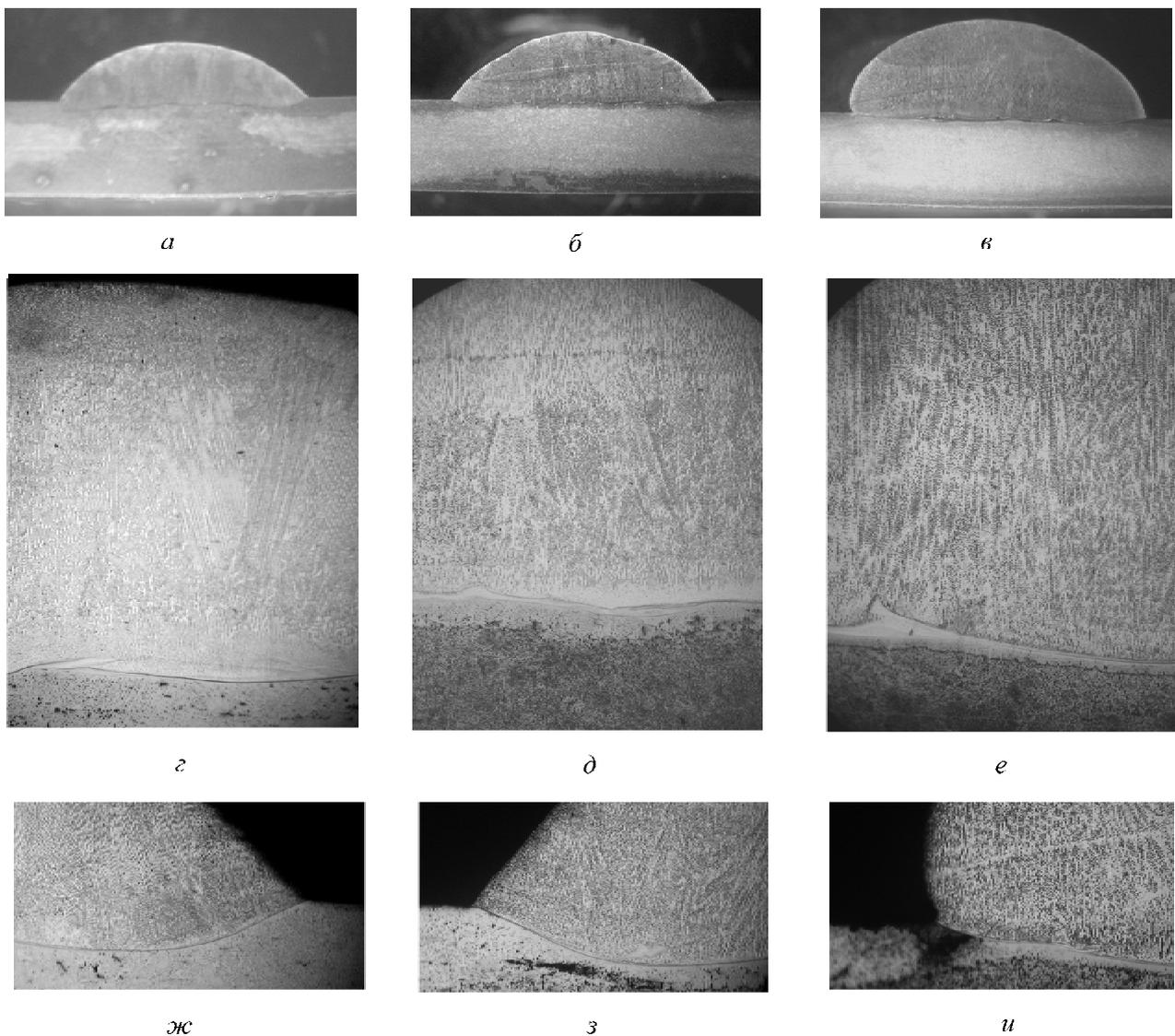


Рис. 2. Структура наплавки различными способами в поперечных сечениях валиков:
а, г, ж – одним электродом обычным способом; *б, д, з* – расщепленным электродом; *в, е, и* – трехфазная наплавка независимой дугой тремя электродами; *а, б, в* – макроснимки, $\times 8$; микроструктура наплавки, $\times 50$:
г, д, е – середина валика; *ж, з, и* – периферийная зона

Библиографические ссылки

1. Лившиц Л. С. Металловедение для сварщиков (сварка сталей). М. : Машиностроение, 1979.
2. Хорн Ф. Атлас структур сварных соединений : пер. с нем. М. : Metallurgiya, 1977.
3. Плазменная наплавка металлов / А. Е. Вайнерман [и др.]. Л. : Машиностроение, 1969.
4. Исследование технологических возможностей наплавки независимой трехфазной дугой плавящимися электродами / А. А. Безруких [и др.] // Вестник СибГАУ. Вып. 2 (28). 2010. С. 131–134.

A. A. Bezrukih, R. A. Meister, M. A. Lubnin, S. A. Gotovko

COMPARATIVE ANALYSIS OF DIFFERENT WAYS SURFACING WITH CONSUMABLE ELECTRODES FOR STAINLESS STEELS WELDING

The results of comparative metallographic analysis surfacing in different ways with coated austenitic class electrodes for welding of stainless steels are given. The advantages of the high-deposition process by an independent three-phase arc are shown.

Keywords: surfacing, austenite, independent three-phase arc, consumable electrodes

© Безруких А. А., Мейстер Р. А., Лубнин М. А., Готовко С. А., 2010

УДК 621.791.76

А. Б. Мишуренко, С. Н. Козловский

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОНТАКТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ХОЛОДНОГО КОНТАКТА ПРИ КОНТАКТНОЙ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКЕ

Рассмотрена проблема оптимизации режимов контактной точечной сварки, описана математическая модель для расчета начального сопротивления холодного контакта.

Ключевые слова: контактная точечная сварка, сопротивление холодного контакта.

Практика контактной точечной сварки и многочисленные результаты опубликованных исследований однозначно подтверждают: одним из основных исходных условий получения качественных сварных соединений является оптимальность начального сопротивления контакта «деталь–деталь» $r_{КТ}$. Его величина и стабильность существенно влияет на размеры ядра, устойчивость процесса против образования выплесков и непроваров [1]. Вместе с тем до настоящего времени при разработке технологий контактной точечной сварки значение $r_{КТ}$ определяют в основном экспериментально для конкретных условий сварки, однако это весьма трудоемко.

На основе проведенных исследований было сделано заключение о том, что из всех известных и исследованных в технологии машиностроения моделей шероховатых поверхностей для свариваемых контактов наиболее приемлема стержневая [2]. Тем более, что она наиболее просто и точно описывает механику контактного взаимодействия двух шероховатых поверхностей (рис. 1).

Согласно принятой модели контакта двух шероховатых поверхностей, проводимость в контактном слое осуществляется по n_r числу единичных параллельных микропроводников диаметром d ($d \rightarrow 0$) и длиной a , образующихся деформируемыми стержнями (микровыступами). Одну составляющую полного электрического сопро-

тивления такого микроконтакта $r_{КТ}$, которая обусловлена сопротивлением микропроводников в контактном слое, имеющих свойства, отличные от свойств основного металла, называют внутренним сопротивлением контакта $r_{КВ}$. Другую же часть, которая обусловлена искривлением линий тока j в приконтактных областях (рис. 2), где можно допустить, что свойства основного металла не изменились, называют микрогеометрическим сопротивлением контакта $r_{МГ}$. Тогда полное электрическое сопротивление контакта $r_{КТ}$ (Ом) будет равно сумме двух этих составляющих [3]:

$$r_{КТ} = r_{МГ} + r_{КВ} \quad (1)$$

Полное внутреннее электрическое сопротивление контакта $r_{ВН}$ (Ом) можно определить следующим образом:

$$r_{ВН} = \frac{r_{ВН}^*}{n_r} = \rho_{\Delta} \frac{a}{n_r \Delta S} = \rho_{\Delta} \frac{2R_{\max}(1-\varepsilon)}{A_r} \quad (2)$$

где $r_{ВН}^*$ – внутреннее электрическое сопротивление единичного контакта, Ом; n_r – количество микроконтактов; ρ_{Δ} – удельное электрическое сопротивление металла в контактном слое, Ом·м; A_r – фактическая площадь контакта, м²; ε – деформации в контактном слое; R_{\max} – наибольшая высота неровностей профиля, м; a – текущая толщина контактного слоя, м; ΔS – средняя площадь единичного контакта, м².