



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

Влияние режимов сварки и различных источников тока на формирование сварного шва стали 12Х18Н10Т





Расул Мамадалиев^{1, а, *}, Виктор Кусков^{1, b}, Павел Бахматов^{2, c}, Дмитрий Ильященко^{3, d}

¹ Тюменский индустриальный университет, ул. Володарского, 38, г. Тюмень, 625000, Россия

² Комсомольский-на-Амуре государственный университет, пр. Ленина, 27, г. Комсомольск-на-Амуре, 621013, Россия

³ Юргинский технологический институт Томский политехнический университет, ул. Ленинградская, 26, г. Юрга, 652055, Россия

^a  <https://orcid.org/0000-0003-0813-0961>,  Mamadaliyev_it@mail.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0001-9690-7982>,  vnkuskov@yandex.ru,

^c  <https://orcid.org/0000-0002-4271-0428>,  mim@knastu.ru, ^d  <http://orcid.org/0000-0003-0409-8386>,  mita8@rambler.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 669.14:620.193:621.791

История статьи:

Поступила: 14 июня 2018

Рецензирование: 25 июня 2018

Принята к печати: 02 ноября 2018

Доступно онлайн: 15 декабря 2018

Ключевые слова:

Ручная дуговая сварка

Покрываемые электроды

Химический состав

Микроструктура

Хром

Никель

Магний

Сталь 12Х18Н10Т

Сварочный выпрямитель

Инвертор

Источник тока

Сила тока

АННОТАЦИЯ

Введение. Энергетическое воздействие, оказываемое в процессе сварки на соединяемые детали из аустенитной стали (12Х18Н10Т), способствует протеканию неблагоприятных процессов в зоне термического влияния (ЗТВ) сварного соединения, а именно изменению структурно-фазового состава, выгоранию легирующих элементов, снижению прочностных характеристик, что является предпосылкой образования очагов коррозионного разрушения в процессе эксплуатации и снижению механических характеристик в сварной конструкции. Все известные способы повышения коррозионной стойкости сварных соединений воздействуют только на наплавленный металл, а на состояние зоны термического влияния кардинально не действуют и ее коррозионную стойкость не меняют. Поэтому актуальной задачей является снижение выгорания легирующих элементов. Этого можно достичь, изменив динамические свойства источника питания в результате использования инверторного выпрямителя. **Цель работы:** измерить размеры ЗТВ и концентрацию легирующих элементов в различных зонах соединения при сварке с инверторным и диодным источниками питания. **В работе исследованы** сварные соединения стали 12Х18Н10Т, полученные с применением источников питания, реализующих разные формы преобразования энергии: ВДУ-506 (традиционная) и ARC 200i (высокочастотная) с применением покрытых электродов марки ОК-61.30. **Методами исследования** являются спектральный анализ химического состава и металлографические исследования металла шва. **Результаты и обсуждение.** Выявлено, что динамические свойства источников питания, реализующих различные способы преобразования энергии, оказывают влияние на химический и структурно-фазовый состав наплавленного металла. Установлено, что использование инверторного выпрямителя в сравнении с диодным способствует увеличению содержания в наплавленном металле Mn на 14 % и Cr на 3 %, уменьшению размеров зерна в наплавленном металле на 40 % и зоне термического влияния на 44 %, сокращению протяженности ЗТВ сварного соединения на 32 %.

Для цитирования: Влияние режимов сварки и различных источников тока на формирование сварного шва стали 12Х18Н10Т / Р.А. Мамадалиев, В.Н. Кусков, П.В. Бахматов, Д.П. Ильященко // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 4. – С. 35–45. – doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.4-35-45.

Введение

Одним из главных эксплуатационных свойств аустенитных сталей с высоким содержанием хрома и никеля является химическая стойкость в солевых, щелочных и кислотных водных

растворах в широком диапазоне температур [1]. Высокие прочность и пластичность сталей делают их уникальным материалом, который имеет немаловажное значение в различных отраслях современного хозяйства. Разнообразные конструкции выполняют с использованием материала из аустенитной стали и соединения его дуговой сваркой. Изделия из хромоникелевых сталей свариваются без ограничений, но требование к устойчивости против внешних воздействий агрессивной среды, приводящих к коррозии шва,

*Адрес для переписки

Мамадалиев Расул Ахмадович, старший преподаватель
Тюменский индустриальный университет,

ул. Володарского, 38,

625000, г. Тюмень, Россия

Тел.: 8 (929) 200-50-04, e-mail: Mamadaliyev_it@mail.ru

имеет повышенное значение [1, 2]. Коррозия проявляется в наплавленном металле или зоне термического влияния, причиной чего может быть электрохимическая гетерогенность структуры и химического состава [3], а также хаотичное расположение напряженного состояния в металле [4]. Повысить коррозионную стойкость пытаются в первую очередь путем воздействия на металл сварного шва. При этом при сварке используют электроды с основным покрытием и наличием в электроде легирующих элементов [4], которые уменьшают вероятность образования дельта-феррита [5]. Редкоземельные элементы также модифицируют металл шва во время и после сварки [6–8]. Наконец, в сварочную ванну внедряют нанопорошки для измельчения структуры шва и повышения ее устойчивости [9–11]. Зона термического влияния зависит не только от тепловложения в сварное соединение, но и от состава материала. Более энергосберегающими и перспективными в этом отношении являются инверторные источники питания [11], которые позволяют сократить протяженность зоны термического влияния и понизить коррозионное разрушение. Цель настоящей работы заключалась в установлении закономерностей влияния вида источника питания сварочной дуги (диодного и инверторного) и режима ручной дуговой сварки покрытыми электродами на структуру наплавленного металла и распределении легирующих элементов в различных зонах соединения.

Для достижения поставленной цели решали следующие задачи: расчет тепловых полей в сварном соединении; термодинамический расчет

одновременного перехода легирующих элементов в наплавленный металл (на примере хрома); оценка влияния эффективной тепловой мощности источника нагрева в интервале 1490...3060 Вт на переход легирующих элементов в наплавленный металл, анализ характера распределения легирующих элементов по высоте наплавленного металла.

Методика исследований

В качестве материала для исследования были использованы пластины горячекатаной коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т (ГОСТ 5632-2014) толщиной 18 мм. Размеры свариваемых пластин составляли 150×150 мм. Химический состав стали приведен в табл. 1.

На пластину в нижнем положении на постоянном токе обратной полярности наплавляли валики электродами марки ОК-61.30 диаметром 3 мм за несколько проходов. Для наплавки использовали два различных выпрямителя: диодный ВДУ-506 (Россия) и инверторный ARC 200i (Кемпу, Финляндия). Наплавку вели поперечными колебательными движениями торца электрода «полумесяцем» с обеспечением скорости наплавки 2...3 м/ч, ширины наплавляемого валика 12...13 мм и высоты 2...3 мм. В ходе наплавки варьировали силу сварочного тока в диапазоне $I_{св} = 60...140$ А с шагом 20 А (интервал исследованных величин эффективной тепловой мощности 1490...3060 Вт) [1–3, 5]. Таким образом, общее количество наплавленных валиков составляло 10 шт; межваликовая температура – 150 °С.

Таблица 1

Table 1

Химический состав стали 12Х18Н10Т

Chemical composition of austenitic stainless chromium-nickel steel

Содержание легирующих элементов, %									
Исследуемый образец	C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	Fe	S	P
	0,11	0,52	1,73	17,91	10,15	0,71	68,85	0,01	0,01
ГОСТ 5632–2014	Не более 0,12	Не более 0,8	Не более 2,0	17,0–19,0	9...11	0,5...0,8	Остальное	Не более 0,02	Не более 0,04

Для определения общего химического состава наплавленного металла, электродного стержня и покрытия использовали рентгенофлуоресцентный спектрометр X-MET 5000 с пакетом программ X-MET. Источником возбуждения служила рентгеновская трубка с родиевым анодом PW 1404/00 (напряжение 60 кВ, сила тока 50 мА). Время на определение одного элемента на глубине 0,1...0,5 мм от поверхности составляло около одной минуты.

Микроструктуру наплавленного металла исследовали с помощью микроскопа металлографического METAM PB-22. Для выявления сварных соединений использовали реактив следующего состава – глицерин : соляная кислота : азотная кислота = 4 : 4 : 3. Применялся только свежеприготовленный реактив. Время травления подбиралось индивидуально для каждого образца (от минуты и более).

Для микроэлементного анализа применили высокоэффективный рентгенофлуоресцентный спектрометр Fischerscope XRAY XDV-SDD с программируемым измерительным столом (X/Y-платформа) и перемещением измерительного модуля по вертикали (трубка с детектором, ось Z) для неразрушающих измерений.

Распределение тепловых полей рассчитывали с использованием разработанной оригинальной программы TPOLE. При этом учитывали теплофизические параметры, размеры пластины, эффективную тепловую мощность

источника нагрева. Вычисления выполняли для каждого валика в отдельности. Выбирали расчетную схему быстро движущегося источника на поверхности полубесконечного тела [17–20]. Значения x , y , z принимали в сантиметрах (рис. 1). С учетом возможности многопроходной сварки приняли постепенное увеличение начальной температуры T_0 с 298 до 798 К через 100 К.

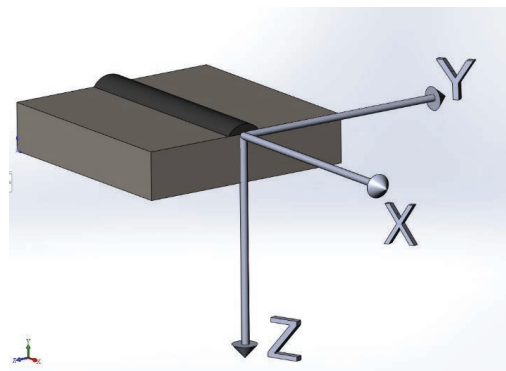


Рис. 1. Схема при расчете в программе TPOLE

Fig. 1. Scheme of calculation in the TPOLE program

Результаты и их обсуждение

Результаты химического анализа электродной проволоки и покрытия электродов ОК 61.30 приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Table 2

Химический состав электродной проволоки

Chemical composition of an electrode wire

C, %	Si, %	Mn, %	Cr, %	Ni, %	Nb, %	S, %	P, %	Fe, %
0,05	0,05	2,03	19,55	9,66	0,02	0,01	0,02	Остальное

Таблица 3

Table 3

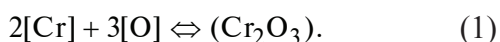
Химический состав электродного покрытия

Chemical composition of an electrode covering

Si, %	Mn, %	Cr, %	Mo, %	Ca, %	Ti, %	V, %	Fe, %	Связующие
1,5	4,69	17,16	0,35	20,0	7,01	1,03	41,07	Остальное

Следует отметить, что в покрытии электродов ОК 61.30 содержится не менее 17 % хрома, 4,6...4,8 % марганца и порядка 41,1 % железа [3]. В проволоке электродов содержится приблизительно 19,6 % хрома, не более 10,0 % никеля и не более 0,06 % кремния.

Чтобы оценить полноту протекания реакции легирующих элементов во время сварки выполнили термодинамические расчеты одновременного перехода легирующих элементов. В качестве примера приведем расчеты для хрома:



Константа равновесия для этой реакции определяется по формуле

$$K_1 = \frac{a_{\text{Cr}_2\text{O}_3}}{a_{\text{Cr}}^2 a_{\text{O}}^3}, \quad (2)$$

где a_i – активность i -го элемента (индекс константы соответствует номеру записанного уравнения реакции).

Рассмотрим взаимодействие образовавшихся оксидов с вводимыми в сталь компонентами, например:



для которой константу равновесия можно считать как

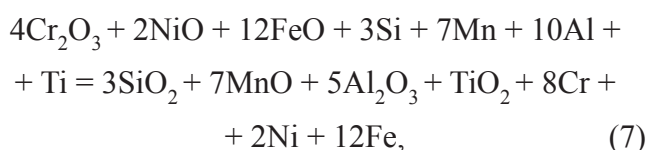
$$K_3 = \frac{a_{\text{Cr}}^2 a_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{a_{\text{Cr}_2\text{O}_3} a_{\text{Al}}^2}. \quad (4)$$

Учтем взаимодействие вводимых в наплавленный металл компонентов с основной сталь-железо:



$$K_{\text{Fe}} = \frac{a_{\text{Fe}}^3 a_{\text{Cr}_2\text{O}_3}}{a_{\text{FeO}}^3 a_{\text{Cr}}^2}. \quad (6)$$

Результирующее уравнение записано как



а величина константы равновесия может быть рассчитана по уравнению

$$\frac{a_{\text{NiO}}^3 a_{\text{SiO}_2}^3 a_{\text{MnO}}^3 a_{\text{Al}_2\text{O}_3}^3 a_{\text{SiO}_2}^2 a_{\text{MnO}}^2 a_{\text{Al}_2\text{O}_3}^2 a_{\text{Cr}_2\text{O}_3}^2 a_{\text{NiO}}^2}{a_{\text{Cr}_2\text{O}_3}^2 a_{\text{Cr}_2\text{O}_3}^2 a_{\text{Cr}_2\text{O}_3}^2 a_{\text{Cr}_2\text{O}_3}^2 a_{\text{NiO}}^2 a_{\text{NiO}}^2 a_{\text{NiO}}^2 a_{\text{SiO}_2}^2 a_{\text{SiO}_2}^2 a_{\text{FeO}}^3 a_{\text{FeO}}^3} \times$$

$$\times \frac{a_{\text{SiO}_2}^2 a_{\text{MnO}}^2 a_{\text{Al}_2\text{O}_3}^2 a_{\text{TiO}_2}}{a_{\text{FeO}}^2 a_{\text{FeO}}^3 a_{\text{FeO}}^2 a_{\text{FeO}}^2} = \frac{a_{\text{MnO}}^7 a_{\text{Al}_2\text{O}_3}^5 a_{\text{TiO}_2}^2 a_{\text{SiO}_2}^3}{a_{\text{Cr}_2\text{O}_3}^4 a_{\text{NiO}}^2 a_{\text{FeO}}^{12}}. \quad (8)$$

С учетом того, что оксиды «чужих» элементов не растворяются в железе (они образуют собственную фазу в виде включений), примем активность оксидов, введенных в наплавленный металл, равную 1. Кислород в железе растворяется незначительно.

С учетом известной зависимости рассчитаем константу

$$K_i = 10^{\frac{-\Delta G_i^0}{2,3^0 RT}}, \quad (9)$$

где R – универсальная газовая постоянная.

В уравнении (9) значения изменения стандартной энергии Гиббса ΔG_i^0 взяли из справочника [8].

Константы равновесия записанных выше реакций при температурах 2000 и 2500 К являются наиболее вероятными крайними точками температур сварочной ванны и капель электродного металла при электродуговой сварке стали покрытыми электродами [20].

Результаты расчетов сведены в табл. 4. По значениям K_i можем определить соотношение конечных и исходных веществ и оценить полноту протекания реакции.

Расчет тепловых полей позволяет оценить распределение температур по длине шва (x) и перпендикулярно шву (y). В соответствии со схемой (см. рис. 1) рассчитали эффективную тепловую мощность в разных точках верхней поверхности пластины. Построение кривых термических циклов осуществляли по двум вариантам:

1) по оси абсцисс откладывали значения y , по оси ординат – значения температур при $x = \text{const}$ (рис. 3 и 5);

2) по оси абсцисс откладывали значения x , по оси ординат – значения температур, при $y = \text{const}$ (рис. 2 и 4);

Для каждой начальной температуры строили свои кривые термических циклов. Для начальной температуры 298 К значения температур в различных точках на поверхности пластины

Константы равновесия рассмотренных реакций

Balance constants of the considered reactions

Взаимодействующие элементы	Стандартное измерение энергии Гиббса – ΔG_i° , Дж/моль при температуре		Константа равновесия реакции K_i при температуре	
	2000 К	2500 К	2000 К	2500 К
$2[\text{Cr}] + 3[\text{O}]$	618,2	483,2	$1,49 \cdot 10^{16}$	$1,30 \cdot 10^{10}$
$[\text{Ni}] + [\text{O}]$	63,1	15,5	44,7	2,11
$[\text{Si}] + 2[\text{O}]$	517,9	424,3	$3,53 \cdot 10^{13}$	$7,57 \cdot 10^8$
$[\text{Mn}] + [\text{O}]$	230,7	179,3	$1,08 \cdot 10^6$	$5,66 \cdot 10^3$
$2[\text{Al}] + 3[\text{O}]$	1034,6	884,1	$1,16 \cdot 10^{27}$	$3,18 \cdot 10^{18}$
$[\text{Ti}] + 2[\text{O}]$	336,1	297,6	$6,19 \cdot 10^8$	$1,69 \cdot 10^6$
$[\text{Fe}] + [\text{O}]$	140,4	115,6	$4,72 \cdot 10^3$	$2,62 \cdot 10^2$
$\text{Cr}_2\text{O}_3 + 3[\text{Ni}]$	–428,9	–436,7	$6,02 \cdot 10^{-11}$	$1,38 \cdot 10^{-9}$
$2[\text{Cr}_2\text{O}_3] + 3[\text{Si}]$	317,3	306,5	$2,00 \cdot 10^8$	$2,60 \cdot 10^6$
$2[\text{Cr}_2\text{O}_3] + 3[\text{Mn}]$	73,9	54,7	85,75	13,96
$2[\text{Cr}_2\text{O}_3] + 2[\text{Al}]$	416,4	400,9	$7,82 \cdot 10^{10}$	$2,46 \cdot 10^8$
$2(\text{NiO}) + [\text{Si}]$	391,7	393,3	$1,77 \cdot 10^{10}$	$1,70 \cdot 10^8$
$3.25(\text{NiO}) + [\text{Mn}]$	167,6	163,8	$2,40 \cdot 10^4$	$2,68 \cdot 10^3$
$3(\text{NiO}) + 2[\text{Al}]$	845,3	837,6	$1,30 \cdot 10^{22}$	$3,39 \cdot 10^{17}$
$(\text{SiO}_2) + 2[\text{Mn}]$	–56,5	–65,7	$3,72 \cdot 10^{-2}$	$4,21 \cdot 10^{-2}$
$3(\text{SiO}_2) + 4[\text{Al}]$	796,3	495,3	$6,78 \cdot 10^{20}$	$2,32 \cdot 10^{10}$
$3(\text{FeO}) + 2[\text{Cr}]$	197,0	136,4	$1,42 \cdot 10^5$	$7,16 \cdot 10^2$
$(\text{FeO}) + [\text{Ni}] \Leftrightarrow [\text{Fe}] + (\text{NiO})$	–77,3	–100,1	$9,50 \cdot 10^{-3}$	$8,04 \cdot 10^{-3}$
$2(\text{FeO}) + [\text{Si}] \Leftrightarrow 2[\text{Fe}] + (\text{SiO}_2)$	237,1	193,1	$1,59 \cdot 10^6$	$1,10 \cdot 10^4$
$(\text{FeO}) + [\text{Mn}] \Leftrightarrow [\text{Fe}] + (\text{MnO})$	90,3	63,7	$2,30 \cdot 10^2$	21,53
$3(\text{FeO}) + 2[\text{Al}]$	613,4	537,3	$1,11 \cdot 10^{16}$	$1,76 \cdot 10^{11}$
$2(\text{FeO}) + [\text{Ti}]$	55,3	65,4	28,0	23,4

приведены на рис. 2 и 3. Линии на графике показывают распределения тепла от центра шва до 8 мм по оси y . В дальнейшем структурные изменения маловероятны.

Для начальной температуры 798 К результаты расчетов представлены на рис. 4 и 5.

Эффективную тепловую мощность источника нагрева определяли исходя из параметров режима сварки по формуле [3]

$$Q_3 = \eta UI,$$

где Q_3 – эффективная тепловая мощность дуги, Вт; η – эффективный коэффициент полезного действия сварочной дуги (для ручной дуговой сварки приняли $\eta = 0,7$); U – напряжение дуги, В; I – сварочный ток, А.

Исследовали наплавку на пластину в интервале эффективной тепловой мощности 1490...3060 Вт.

На рис. 6 показаны зависимости содержания хрома в наплавленном металле сварных соединений из стали 12X18H10T от эффективной

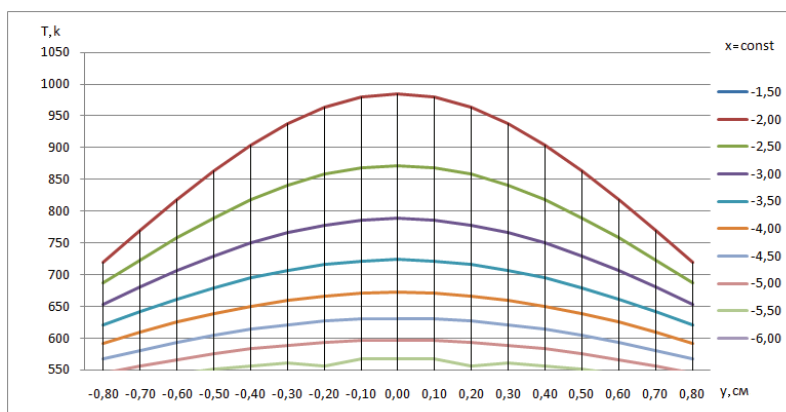


Рис. 2. Распределение температур по оси Y (перпендикулярно оси шва) при начальной температуре пластины 298 К

Fig. 2. Temperatures distribution on Y axis (perpendicular to the joint axis) at the reference temperature 298 K

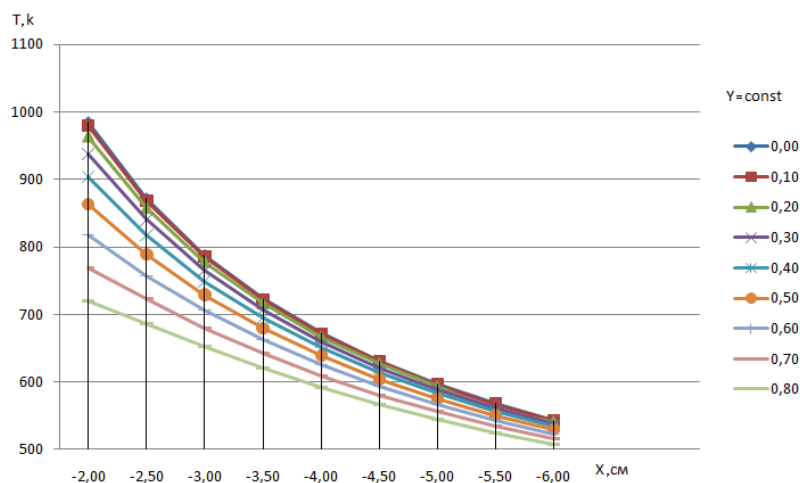


Рис. 3. Распределение температур по оси X вдоль шва (при постоянных значениях Y) при начальной температуре 298 К

Fig. 3. Temperatures distribution on X axis along the joint (at constant Y values) at the reference temperature 298 K

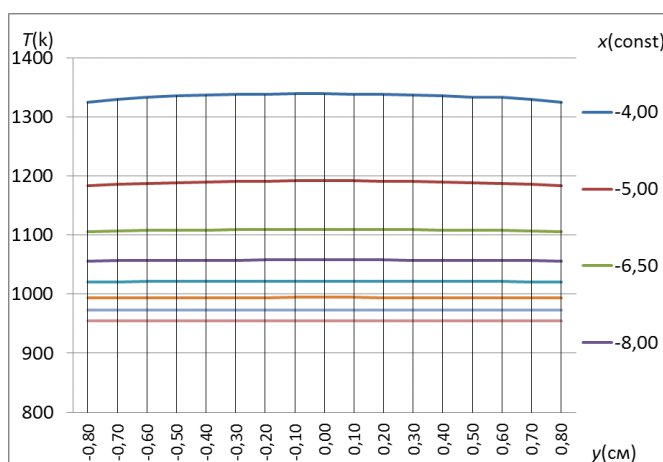


Рис. 4. Распределение температур вдоль оси Y при начальной температуре 798 К

Fig. 4. Temperatures distribution along axis Y at the reference temperature 798 K

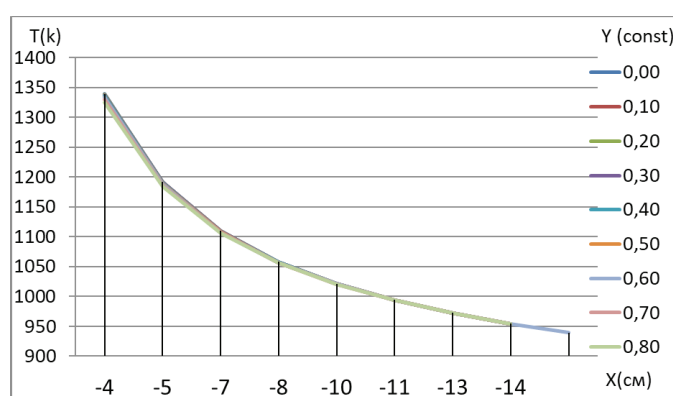


Рис. 5. Распределение температур вдоль оси X при начальной температуре 798 К

Fig. 5. Temperatures distribution along axis X at the reference temperature 798 K

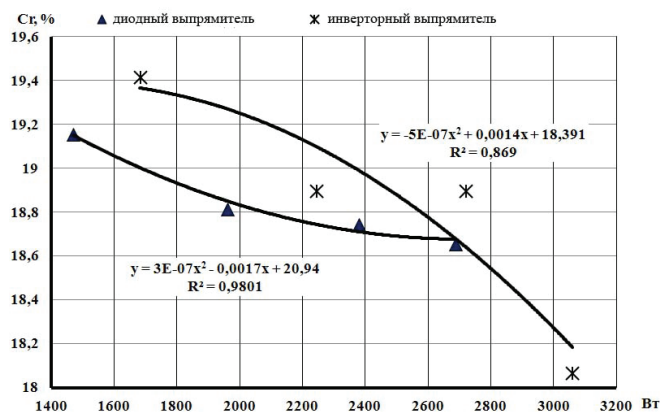


Рис. 6. Зависимость содержания хрома в наплавленном металле от эффективной тепловой мощности дуги при получении соединений стали 12Х18Н10Т электродами ОК-61.30 (в данном случае в приведенных на графике уравнениях регрессии $y = Cr \%$, $x = Q_3$, Вт)

Fig. 6. Dependence of chrome content in the weld metal on the effective thermal power of an arch when receiving joints of austenitic stainless chromium-nickel steel by ОК-61.30 electrodes

тепловой мощности дуги при использовании различных источников питания.

Инверторный источник обладает большей на 12 % величиной Q_3 по сравнению с выпрямителем. Этот вывод сделан из наблюдения за формированием сварочной ванны и термодинамической картиной, происходящей в ней. Так, при достижении $Q_3 = 2700$ Вт при использовании диодного выпрямителя металл шва достигал максимальной жидкотекучести, и формирование валика становилось затруднительным. В свою очередь, при использовании инверторного источника такой эффект наблюдался на значительно больших токах, когда Q_3 достигала 3050 Вт.

Микроструктура наплавленного металла и зоны термического влияния при использовании источников питания с различными динамическими свойствами и на режиме сварки $I_{св} = 80$ А представлена на рис. 7.

На рис. 7, а и б показана микроструктура переходных зон от металла наплавленного валика к основному металлу. В обоих исследованных наплавленных валиках зона термического влияния плавно без резких границ переходит к основному металлу. Наименьшая ширина зоны термического влияния (75 мкм) зафиксирована в соединении, выполненном с помощью инверторного источника питания (рис. 7, б), а наибольшая (300 мкм) –

в соединении, выполненном с диодным выпрямителем (рис. 7, а).

При использовании диодного выпрямителя в наплавленном металле структура неоднородная, дендриты разной длины, хорошо развитые. Их средняя ширина составляет ≈ 2 мкм. В междендритных промежутках металл имеет зеренную структуру, характерную для хромоникелевого аустенита со средним размером ≈ 20 мкм (рис. 7, в).

В случае инверторного выпрямителя наплавленный металл более однороден по структуре; дендриты в среднем менее протяженные, их ширина меньше 2 мкм; междендритное пространство имеет меньшую площадь; зеренное строение выражено ярче, а средний размер зерна в полтора раза меньше и составляет ≈ 12 мкм (рис. 7, г).

Зона термического влияния в обоих случаях имеет полиэдрическое зеренное строение, характерное для хромоникелевого аустенита (рис. 7, д и е). Средний размер зерна заметно больше, чем в наплавленном металле, особенно в образце, выполненном с помощью диодного источника, где он достигает 54 мкм (рис. 7, д). Некоторые зерна содержат двойники. В зоне термического влияния сварного соединения, полученного с помощью инверторного выпрямителя, средний размер зерна меньше на ≈ 30 мкм, а степень двойникования зерен выше (рис. 7, е).

Структура основного металла одинакова, средний размер зерен составляет 20 мкм.

Выводы

1. Получили результаты натурного эксперимента по определению зависимостей перехода легирующих элементов от параметров режима сварки и типа источника питания при использовании покрытых электродов марки ОК61.30.

2. Установлено, что применение инверторного источника по сравнению с диодным выпрямителем позволяет вести сварку на больших энергетических мощностях с обеспечением удовлетворительного формирования валика. При этом на 32 % увеличивается ЗТВ, но стабилизируется содержание основных легирующих элементов: Mn на 14 % и Cr на 3 %, уменьшается размер зерна в наплавленном металле на 40 % и зоне термического влияния на 44 %. Такой

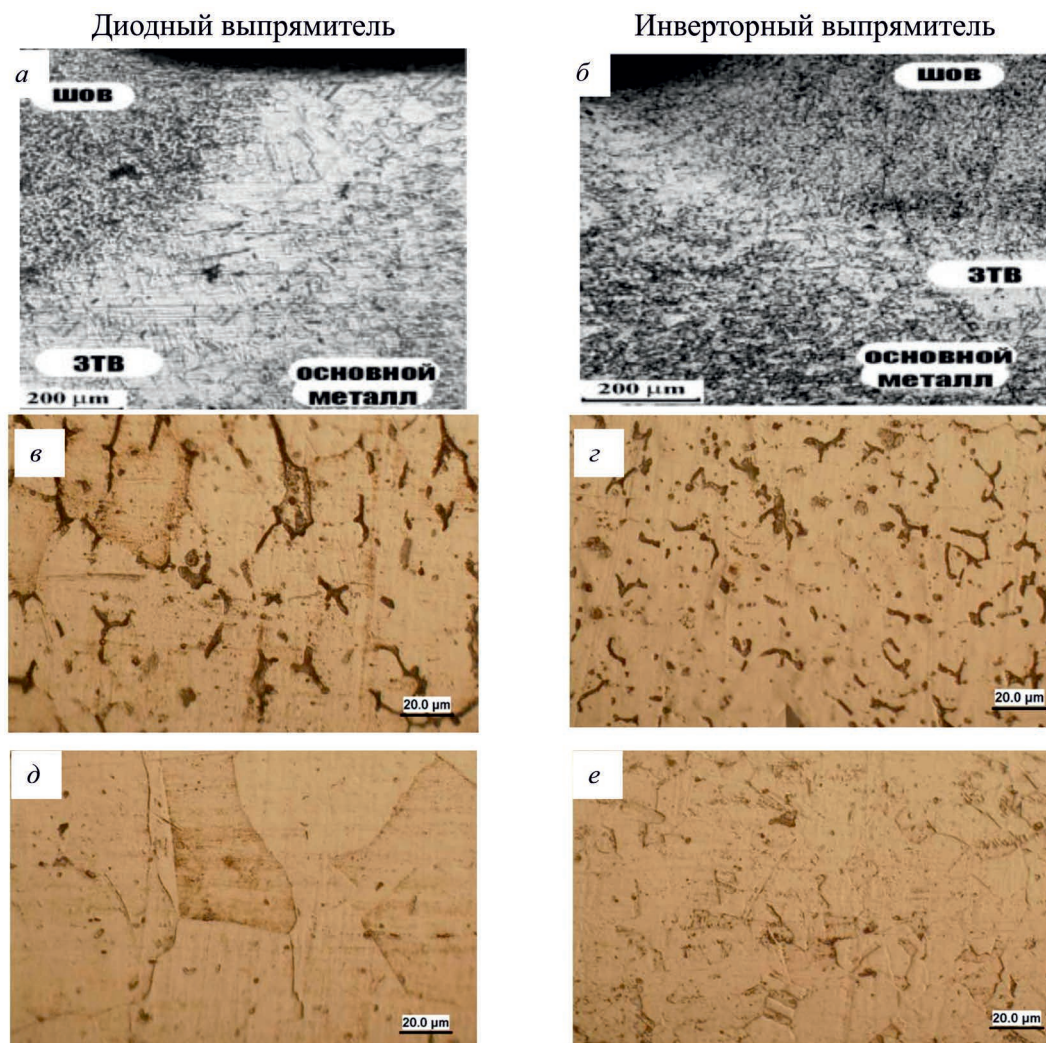


Рис. 7. Микроструктура переходных зон (а, б), металла шва (в, г) и ЗТВ (д, е) при сварке пластин из стали 12Х18Н10Т электродами ОК 61.30 с применением различных источников питания

Fig. 7. Microstructure of transition zone (а, б), weld metal (в, г) and HAZ (д, е) in the joints of austenitic stainless chromium-nickel steel, obtained with the use of ОК 61.30 electrodes and various power supplies

эффект может быть применен для увеличения скорости сварки либо глубины проплавления, а также для снижения энергетических параметров режима с сохранением концентрации легирующих элементов.

3. С повышением начальной температуры различие между температурами вдоль осей Y и X уменьшается, и при $T_0 = 598$ К они практически сливаются при шаге $\Delta Y = 0,1$ см, т. е. на расстоянии более 1 см перпендикулярно оси шва практически не происходят изменения температуры, линии $T = f(y)$ имеют меньшую кривизну (спрямляются). Повышение начальной температуры приводит к росту температуры вблизи очага нагрева. Расчеты показывают, что увеличение T_0

от 298 до 798 К повышает температуру в точке $x = 2,0$ см с 964 К до $T_{пл}$ при $y = 0,2$ (–0,2) см.

Список литературы

1. Arc characteristics and metal transfer process of hybrid laser double GMA welding / H.L. Wei, H. Li, L.J. Yang, Y. Gao, X.P. Ding // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. – Iss. 77 (5–8). – P. 1019–1028. – doi: 10.1007/s00170-014-6537-5.
2. Secondary austenite precipitation during the welding of duplex stainless steels / S. de Alencar Pires, M.F. de Campos, C.J. Marcelo, C.R. Xavier // Materials Science Forum. – 2016. – N 869. – P. 562–566.
3. Kuskov V.N., Mamadaliev R.A., Obukhov A.G. The transition of the alloying elements in the weld metal

when welding steel 12X18H10T // Fundamental Research. – 2013. – N 11. – P. 1794–1797.

4. Physical nature of the processes in forming structures, phase and chemical compositions of medium-carbon steel welds / D.P. Il'yaschenko, D.A. Chinakhov, V.I. Danilov, G.V. Schlyakhova, Yu.M. Gotovshchik // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – N 91 (1). – P. 45–51.

5. Influence of filler wire composition on weld microstructures of a 444 ferritic stainless steel grade / V. Villaret, F. Deschaux-Beaume, C. Bordreuil, S. Rouquette, C. Chovet // Journal of Materials Processing Technology. – 2013. – Vol. 213, iss. 9. – P. 1538–1547. – doi: 10.1016/j.jmatprotec.2013.03.026.

6. Пановко В.М. О коэффициентах перехода и расчете химического состава металла при наплавке // Сварочное производство. – 1970. – № 8. – С. 33–35.

7. Petronius I., Bamberger M. The influence of basic vs. rutile electrode on the composition of duplex stainless steel weldments // Materials Research and Advanced Techniques. – 2002. – Vol. 93, iss. 2. – P. 155–159. – doi: 10.3139/146.020155.

8. Silva E.C. da, Garutti A.C. Engineering optimization experiments applied to welded joints // SAE Technical Papers. – 1997. – N 5. – P. 27–35.

9. Мазель А.Г. Об оценке переноса металла в дуге при ручной сварке по осциллограммам тока и напряжения дуги // Сварочное производство. – 1957. – № 12. – С. 9–12.

10. Experimental and numerical investigation of an electromagnetic weld pool control for laser beam welding / M. Bachmann, V. Avilov, A. Gumenyuk, M. Rethmeier // Physics Procedia. – 2014. – Vol. 56. – P. 515–524. – doi: 10.1016/j.phpro.2014.08.006.

11. Вотинова Е.Б., Шалимов М.П. Взаимосвязь усредненного и парциальных коэффициентов перехода элементов при ручной дуговой сварке // Вестник ЮУрГУ. Серия: Metallurgy. – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 88–90.

12. Votinova E.B., Shalimov M.P. Application of the complete material balance method to estimate the composition of weld metal in manual arc welding // Solid State Phenomena. – 2017. – Vol. 265. – P. 762–766. – doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.265.762.

13. Shalimov M.P., Votinova E.B. Optimization of welding electrode coating composition based on simulation of interaction processes in metal-slag-gas system // Materials Science Forum. – 2016. – Vol. 870. – P. 593–597. – doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.870.593.

14. Ueyama T. Welding power sources // Journal of the Japan Welding Society. – 2008. – Vol. 77, iss. 2. – P. 129–134. – doi: 10.2207/jjws.77.129.

15. Yamaguchi T., Taira T., Hirabayashi K. Improvement of toughness of submerged arc weld metal of controlled rolled steel plates (Report 1) // Journal of the Japan Welding Society. – 1977. – Vol. 46, iss. 9. – P. 656–659. – doi: 10.2207/qjws1943.46.9_656.

16. Sorokin L.I., Sidlin Z.A. Evaluation of the effect of alloying elements on pore formation when welding nickel-chromium alloys // Welding International. – 1998. – Vol. 12, iss. 3. – P. 229–232.

17. Finite element analysis of temperature field in multi-pass welding of thick steel plate / G. Xu, B. Du, Z. Dong, J. Zhu // Transactions of the China Welding Institution. – 2013. – Vol. 34, iss. 5. – P. 87–90.

18. Mita T. Participation in the welding power sources // Journal of the Japan Welding Society. – 2014. – Vol. 83, iss. 2. – P. 85–87.

19. Alloying elements transition into the weld metal when using an inventor power source / R.A. Mamadaliev, V.N. Kuskov, A.A. Popova, D.V. Valuev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – N 127. – P. 15–24.

20. Modelling of friction stir welding of 304 stainless steel / A. Smith, M. Al-Moussawi, A. Young, S. Cater, M. Faraji // Proceedings of the European Simulation and Modelling Conference ESM'2016. – Las Palmas, Spain, 2016. – P. 351–355.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2018 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Influence of Welding Conditions and Different Current Sources on Formation of Welded Seam of Steel Austenitic Stainless Chromium-Nickel Steel

Rasul Mamadaliyev^{1, a, *}, Viktor Kuskov^{1, b}, Pavel Bakhmatov^{2, c}, Dmitriy Ilyashchenko^{3, d}

¹ Tyumen Industrial University, 38 Volodarskogo, Tyumen, 625000, Russian Federation

² Komsomolsk-na-Amure State University, 27 Lenin Prospect, Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russian Federation

³ Yurga Institute of Technology, TPU Affiliate, 26 Leningradskaya st., Yurga, 652055, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0003-0813-0961>, Mamadaliyev_it@mail.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0001-9690-7982>, vnkuskov@yandex.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0002-4271-0428>, mim@knastu.ru, ^d <http://orcid.org/0000-0003-0409-8386>, mita8@rambler.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 14 June 2018

Revised: 25 June 2018

Accepted: 02 November 2018

Available online: 15 December 2018

Keywords:

Manual arc welding

Coated electrode

Chemical composition

Microstructure

Chromium

Nickel

Magnesium

Austenitic stainless chromium-nickel steel

Welding rectifier

Inverter

Current source

Current strength

ABSTRACT

Introduction. Energy impact exerted by the welding process on the joined parts made of austenite steel contributes to the unfavorable processes in the heat-affected zone (HAZ) of the welded joint, namely to the change of the structural-phase composition, burnout of alloying elements, reduction of strength characteristics, which is a prerequisite to the formation of nuclei of corrosion attack during operation and a decrease in mechanical characteristics of the welded structure. All known methods of enhancing corrosion resistance of welded joints influence only the weld metal, but have no significant influence the heat-affected zone state and do not change its corrosion resistance. **The purpose of the work.** Therefore, selection of welding conditions, reducing the burnout of alloying elements and shortening the HAZ extension is a relevant task. **The paper studies** the welded joints of austenitic stainless chromium-nickel steel obtained by welding using power sources that implement different forms of energy conversion: VDU-506 (traditional) and ARC 200i (high-frequency) with application of coated electrodes of OK-61.30 grade. **The research methods** are spectral analysis of the chemical composition and metallographic studies of weld metal. **Results and Discussion.** It is revealed that the dynamic properties of power sources that implement different methods of energy conversion influence the chemical, structural and phase composition of the weld metal. It is established that the use of an inverter rectifier, as compared with a diode one, promotes a content increase in the weld metal: Mn by 14% and Cr by 3%; a decrease of the grain size in the weld metal by 40% and in the heat-affected zone by 44%; a reduction in the HAZ extension of the welded seam by 32%.

For citation: Mamadaliyev R.A., Kuskov V.N., Bakhmatov P.V., Ilyashchenko D.P. Influence of welding conditions and different current sources on formation of welded seam of steel austenitic stainless chromium-nickel steel. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2018, vol. 20, no. 4, pp. 35–45. doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.4-35-45. (In Russian).

References

1. Wei H.L., Li H., Yang L.J., Gao Y., Ding X.P. Arc characteristics and metal transfer process of hybrid laser double GMA welding. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, vol. 77, iss. (5–8), pp. 1019–1028. doi: 10.1007/s00170-014-6537-5.
2. Alencar Pires S. de, Campos M.F. de, Marcelo C.J., Xavier C.R. Secondary austenite precipitation during the welding of duplex stainless steels. *Materials Science Forum*, 2016, vol. 869, pp. 562–566. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.869.562.

* Corresponding author

Mamadaliyev Rasul A., Senior Lecturer

Tyumen Industrial University

38 Volodarskogo,

Tyumen, 625000, Russian Federation

Tel.: 8 (929) 200-50-04, e-mail: Mamadaliyev_it@mail.ru

3. Kuskov V.N., Mamadaliev R.A., Obukhov A.G. The transition of the alloying elements in the weld metal when welding steel 12X18H10T. *Fundamental Research*, 2013, no. 11, pp. 1794–1797.
4. Il'yaschenko D.P., Chinakhov D.A., Danilov V.I., Schlyakhova G.V., Gotovshchik Yu.M. Physical nature of the processes in forming structures, phase and chemical compositions of medium-carbon steel welds. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 91 (1), pp. 45–51. doi: 10.1088/1757-899X/91/1/012006.
5. Villaret V., Deschaux-Beaume F., Bordreuil C., Rouquette S., Chovet C. Influence of filler wire composition on weld microstructures of a 444 ferritic stainless steel grade. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, vol. 213, iss. 9, pp. 1538–1547. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2013.03.026.
6. Panovko V.M. O koeffitsientakh perekhoda i raschete khimicheskogo sostava metalla pri naplavke [On the conversion factors and the calculation of the chemical composition of the metal during welding]. *Svarochnoe proizvodstvo = Welding Production*, 1970, no. 8, pp. 33–35. (In Russian).
7. Petronius I., Bamberger M. The influence of basic vs. rutile electrode on the composition of duplex stainless steel weldments. *Materials Research and Advanced Techniques*, 2002, vol. 93, iss. 2, pp. 155–159. doi: 10.3139/146.020155.
8. Silva E.C. da, Garutti A.C. Engineering optimization experiments applied to welded joints. *SAE Technical Papers*, 1997, no. 5, pp. 27–35.
9. Moselle A.G. Ob otsenke perenosa metalla v duge pri ruchnoi svarke po ostsillogrammam toka i napryazheniya dugi [About assessment of transfer of metal in an arch at manual welding according to oscillograms of current and tension of an arch]. *Svarochnoe proizvodstvo = Welding Production*, 1957, no. 12, pp. 9–12. (In Russian).
10. Bachmann M., Avilov V., Gumenyuk A., Rethmeier M. Experimental and numerical investigation of an electromagnetic weld pool control for laser beam welding. *Physics Procedia*, 2014, vol. 56, pp. 515–524. doi: 10.1016/j.phpro.2014.08.006.
11. Votnova E.B., Shalimov M.P. Vzaimosvyaz' usrednennogo i partial'nykh koeffitsientov perekhoda elementov pri ruchnoi dugovoi svarke [The relationship of average and partial coefficients of element transition in manual arc welding]. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Metallurgiya = Bulletin of the South Ural State University. Series: Metallurgy*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 88–90.
12. Votnova E.B., Shalimov M.P. Application of the complete material balance method to estimate the composition of weld metal in manual arc welding. *Solid State Phenomena*, 2017, vol. 265, pp. 762–766. doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.265.762.
13. Shalimov M.P., Votnova E.B. Optimization of welding electrode coating composition based on simulation of interaction processes in metal-slag-gas system. *Materials Science Forum*, 2016, vol. 870, pp. 593–597. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.870.593.
14. Ueyama T. Welding power sources. *Journal of the Japan Welding Society*, 2008, vol. 77, iss. 2, pp. 129–134. doi: 10.2207/jjws.77.129.
15. Yamaguchi T., Taira T., Hirabayashi K. Improvement of toughness of submerged arc weld metal of controlled rolled steel plates (Report 1). *Journal of the Japan Welding Society*, 1977, vol. 46, iss. 9, pp. 656–659. doi: 10.2207/qjws1943.46.9_656.
16. Sorokin L.I., Sidlin Z.A. Evaluation of the effect of alloying elements on pore formation when welding nickel-chromium alloys. *Welding International*, 1998, vol. 12, iss. 3, pp. 229–232.
17. Xu G., Du B., Dong Z., Zhu J. Finite element analysis of temperature field in multi-pass welding of thick steel plate. *Transactions of the China Welding Institution*, 2013, vol. 34, iss. 5, pp. 87–90.
18. Mita T. Participation in the welding power sources. *Journal of the Japan Welding Society*, 2014, vol. 83, iss. 2, pp. 85–87.
19. Mamadaliev R.A., Kuskov V.N., Popova A.A., Valuev D.V. Alloying elements transition into the weld metal when using an inventor power source. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, no. 127, pp. 15–24.
20. Smith A., Al-Moussawi M., Young A., Cater S., Faraji M. Modelling of friction stir welding of 304 stainless steel. *Proceedings of the European Simulation and Modelling Conference ESM'2016*, Las-Palmas, Spain, 2016, pp. 351–355.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.