

ВОПРОСЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И СВАРКИ

УДК 621.791.927.5

*С. К. Елсуков, И. В. Зорин, Г. Н. Соколов, А. А. Артемьев, Ф. А. Кязымов,
Г. О. Сухобоков, А. А. Самойлов, С. А. Фастов, В. А. Фетисов*

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАПЛАВКИ РАСЩЕПЛЕННЫМ ЭЛЕКТРОДОМ НА ФОРМИРОВАНИЕ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА СИСТЕМЫ Ni – Cr – Mo – Nb

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: naplavka34@yandex.ru

Произведена оценка совместного влияния напряжения на дуге, угла наклона электрода и расстояния между электродными проволоками при наплавке расщепленным электродом на формирование наплавленного металла. Выявлен диапазон значений (10–30°) угла наклона электрода, при котором обеспечивается качественное формирование наплавленного металла при минимальной доле (30 %) участия в нем основного металла. Определены коэффициенты переходов легирующих элементов в наплавленный металл и исследована структура наплавленного металла, полученного под флюсами различного состава.

Ключевые слова: наплавка, расщепленный электрод, инконель, угол наклона, флюс.

*S. K. Elskov, I. V. Zorin, G. N. Sokolov, A. A. Artem'ev, F. A. Kjazymov,
G. O. Suhobokov, A. A. Samojlov, S. A. Fastov, V. A. Fetisov*

INFLUENCE OF THE PARAMETERS OF CLADDING BY SPLIT ELECTRODE ON THE FORMATION OF THE WELDED METAL OF THE SYSTEM Ni-Cr-Mo-Nb

Volgograd State Technical University

The joint influence of voltage on the arc, the tilt angle of the electrode and the distance between the electrode wires during the deposition by a split electrode on the formation of the weld metal is estimated. The range of values (10–30 °) of the tilt angle of the electrode is revealed, which ensures the qualitative formation of welded metal with a minimum fraction (30 %) of the participation of the base metal in it. The chemical composition and structure of the weld metal obtained under fluxes of different composition was studied.

Keywords: surfacing, split electrode, inconel, tilt angle, flux.

Введение

Дуговая наплавка широко применяется для формирования жаро- и коррозионностойкого наплавленного металла в производстве сосудов и аппаратов нефтехимического назначения [1–2]. В условиях современного рынка требуется постоянное совершенствование способов, технических приемов наплавки и сварочного оборудования для повышения производительности при сохранении или улучшения качества наплавленного металла.

На сегодняшний день одноэлектродный процесс наплавки является не самым эффективным способом наплавки из-за низкой производительности и большой доли участия основного металла в наплавленном слое. Повысить производительность процесса наплавки можно

путем формирования за один проход широко-слоистого наплавленного металла с минимальной долей в нем основного металла.

Способ наплавки колеблющимся электродом позволяет получить широкослоистый наплавленный металл (до 50 мм) и обеспечить малую долю участия основного металла в наплавленном (около 20–30) %, что обусловлено перераспределением тепла дуги по большей площади поверхности изделия [3] при поперечных перемещениях электродной проволоки (рис. 1, а). Однако использование такого технологического приема изменяет характер гидродинамических потоков в сварочной ванне, в результате чего управление тепловложением в основной металл реализуется в узком диапазоне возможных режимов.

При наплавке дугой косвенного действия плавящимся электродом большой коэффициент расплавления электродов (до 42 г/А·ч) достигается за счет повышенного падения напряжения в приэлектродных областях и одновременного плавления двух проволок, расположенных под углом друг к другу и подключенных к разным полюсам источника питания (рис. 1, б) [4]. Однако по причине различия в скорости расплавления катодного и анодного металлов стабильное существование дуги возможно лишь при определенном соотношении между скоростями подачи электродных проволок. С учетом того, что минимальное тепловложение в основной металл в данном способе наплавки достигается только при углах между проволоками не менее 100°, конструкция подающего механизма усложняется.

При наплавке трехфазной дугой в две фазы системы питания включаются два электрода, а изделие включается в третью фазу (рис. 1, в). В этом случае существуют три дуги: две дуги между электродами и изделием, а третья дуга – между электродами [5]. Характер формирования наплавленного металла в этом случае также зависит от магнитного взаимодействия сварочных дуг, которые в случае их питания трехфазным током существенно изменяют свое пространственное положение в зависимости от порядка следования потенциалов и угла наклона электродов. Это вызывает неоднородность давления дуг на расплав металла и нарушение гидродинамических потоков в сварочной ванне.

Особый технологический интерес вызывает способ наплавки под флюсом двумя проволочными электродами с подачей в зону горения дуги дополнительной заземленной проволоки (ДЭЗП) (рис. 1, з). Существенным преимуществом процесса наплавки ДЭЗП под флюсом являются увеличение производительности и возможность изменять в широких пределах тепловложение в основной металл [6]. Однако сложность раздельного регулирования параметров режима наплавки на каждом проволочном электроде пока сдерживает применение данного процесса.

Известен способ многоэлектродной наплавки, при котором сварочные проволоки подключены к общему полюсу источника питания и подаются одновременно в зону наплавки (рис. 1, д) [7]. При определенном выборе напряжения на дуге, силы тока (скорости подачи проволоки) в двух- или многоэлектродной системе происходит самопроизвольное импульсное (поочередное) плавление электродов без применения специализированного оборудования или устройств. Такой эффект обеспечивает уменьшение тепловложения в наплавляемое изделие и повышает производительность наплавки. Увеличение количества электродов обуславливает снижение стабильности дугового процесса из-за трудности контроля скорости подачи большого количества (более трех) электродных проволок и высокой стоимости мощных сварочных источников тока. Более широкое распространение получил способ наплавки расщепленным электродом с использованием двух проволок (рис. 1, е) [8].

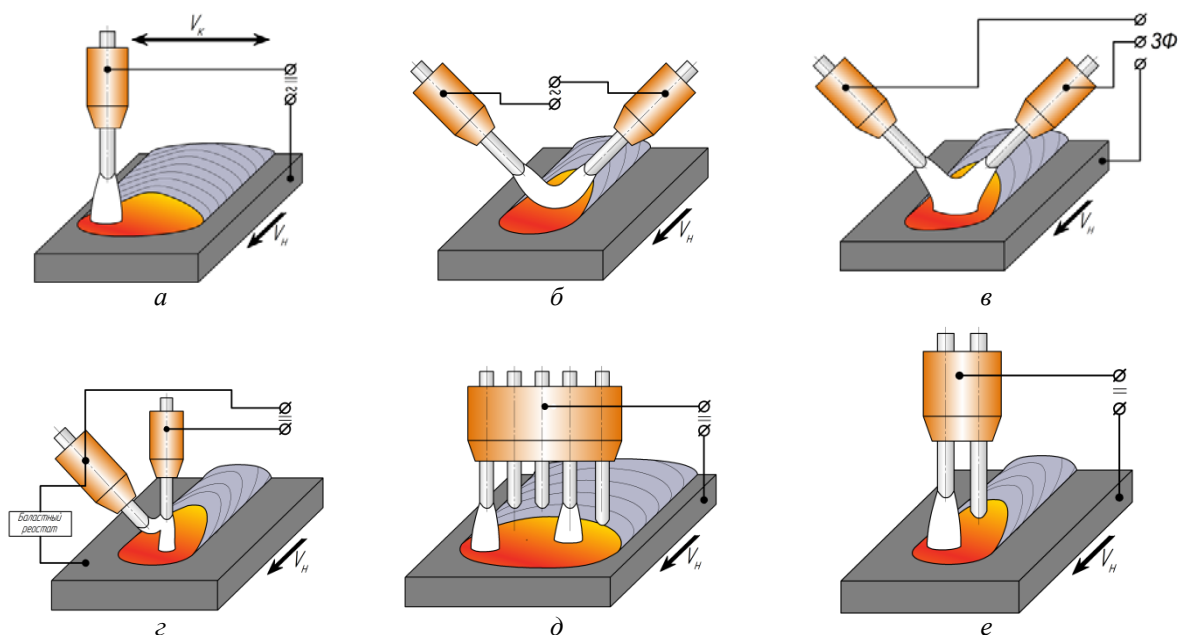


Рис. 1. Разновидности способов одно- и двухэлектродной дуговой наплавки:

а – колеблющимся электродом; б – косвенной дугой; в – трехфазной дугой;
 з – с дополнительной заземленной проволокой; д – многоэлектродная; е – расщепленным электродом

Управлять формированием наплавленного металла в этом случае можно как изменяя режим наплавки, так и регулируя иные технологические параметры, одним из которых является изменение угла наклона электрода. Этот параметр является одним из эффективных способов регулирования глубины провара и ширины наплавленного металла.

Цель работы заключается в выявлении влияния флюсов различного состава и технологических параметров наплавки на формирование наплавленного металла системы Ni–Cr–Mo–Nb.

Методика эксперимента

Наплавку способом расщепленного электрода (рис. 2) производили на промышленном сварочном автомате А6 MasterTrack (ESAB) с использованием проволоки диаметром 2,4 мм марки ОК Autrod NiCrMo-3 (С 0,03; Ni 60; Cr 20–23; Mo 8–10; Nb 3,15–4,15; Mn 0,3; Si 0,2). С целью оценки эффективности применения при наплавке данной марки проволоки использовали шлаки алюминатнофторидного высокоосновного типа (флюс ОК 10.16 (EN ISO 18274: S Ni 6625), основно-фторидно-силикатного типа (флюс ФЦ-18 (ГОСТ Р 52222–2004) и кальциево-силикатного типов (ОК 10.92 (ESAB) и UF-S (ПАО «ЧТПЗ»)) соответственно. С целью уменьшения доли участия основного металла в наплавленном экспериментальные образцы из стали 20 наплавляли на прямой полярности постоянного тока. В процессе наплавки варьировали основные параметры режима

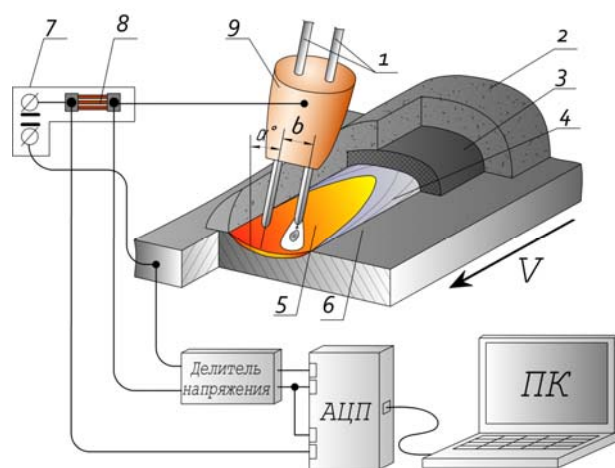


Рис. 2. Схема наплавки расщепленным электродом с регистрацией сварочного тока и напряжения на дуге: 1 – электродные проволоки; 2 – сварочный флюс; 3 – шлаковая корка; 4 – наплавленный металл; 5 – сварочная ванна; 6 – изделие; 7 – источник сварочного тока LAF 1000; 8 – измерительный шунт; 9 – токоподводящий узел; b – межэлектродное расстояние; α – угол наклона электрода от вертикальной плоскости; АЦП – аналого-цифровой преобразователь

в диапазонах: напряжения на дуге (32–39 В), сварочный ток (350–750 А), скорость наплавки (18–42 м/ч), угол наклона расщепленного электрода (0–60°). Межэлектродное расстояние составляло 8 и 12 мм. Изменение сварочного тока и напряжения на дуге в процессе наплавки регистрировали с частотой дискретизации 5 кГц с использованием 12 разрядного многоканального аналого-цифрового преобразователя LA-20USB, подключенного к персональному компьютеру. Обработку полученных осциллограмм производили с использованием специализированного программного обеспечения PowerGraph 3.3.

Химический состав наплавленного металла определяли с использованием оптико-эмиссионного спектрометра ARL 3460. Фазовый состав металла определяли рентгеноструктурным анализом микрошлифов металла в медном излучении (Ni-фильтр) на дифрактометре Bruker D8 Advance. Структуру наплавленного металла изучали с помощью электронной микроскопии (растровый двухлучевой электронно-ионный микроскоп FEI Versa 3D). Твердость наплавленного металла контролировали методом Роквелла на приборе ТН-500.

Результаты и их обсуждение

Исследование влияния величины сварочного тока в диапазоне 350–750 А показало, что качественное формирование наплавленного металла при обеспечении максимальной производительности процесса достигается при значениях плотности тока в диапазоне 155–160 А/мм² в электродной проволоке, на которой существует сварочная дуга в данный момент времени. Вместе с тем дуговой процесс не чувствителен к изменению плотности тока в исследуемом диапазоне и сопровождается периодическими короткими замыканиями, частота которых варьируется в пределах 6–10 Гц.

Анализ осциллограмм процесса наплавки, полученных при использовании флюсов на основе различных шлаковых систем, показывает, что их химический состав в первую очередь оказывает влияние на длительность периода замыкания каплями электродного металла дугового промежутка и величину колебаний сварочного тока. При наплавке на прямой полярности эти характеристики стабилизируются и достигают наилучших значений для случая использования флюса UF-S и его зарубежного аналога ОК 10.92 (рис. 3, а, в). Очевидно, что относительно небольшое содержание в обоих

флюсах фтористого кальция, а также наличие в их составе, по данным химического анализа, элементов с низким потенциалом ионизации – калия и натрия, способствует более устойчивому существованию сварочной дуги под этими флюсами. Вследствие этого, условия переноса электродного металла в дуге улучшаются, о чем свидетельствует достижение наибольших (с учетом уменьшения на прямой полярности доли участия основного металла в наплавленном на 35–40 %) значений коэффициентов перехода ($k_{п}$) хрома и молибдена (рис. 4, в) в наплавленный металл.

При использовании флюсов, в составе которых фтористый кальций является базовым компонентом (ФЦ-18 и ОК 10.16) значения $k_{п}$ для

хрома и молибдена несколько уменьшаются относительно значений $k_{п}$ для этих элементов, полученных при наплавке под флюсами UF-S и ОК 10.92. Такое изменение коэффициента перехода легирующих элементов характеризует его повышенную зависимость от устойчивости дугового процесса, а не от химической активности шлаковой системы. В тоже время анализ изменения значения $k_{п}$ для ниобия отражает его большую чувствительность к содержанию свободного кислорода в шлаке. Поэтому наибольший коэффициент перехода ниобия в наплавленный металл обеспечивается при использовании кальциево-фторидных флюсов, содержащих небольшое суммарное количество кислотных оксидов $\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2$.

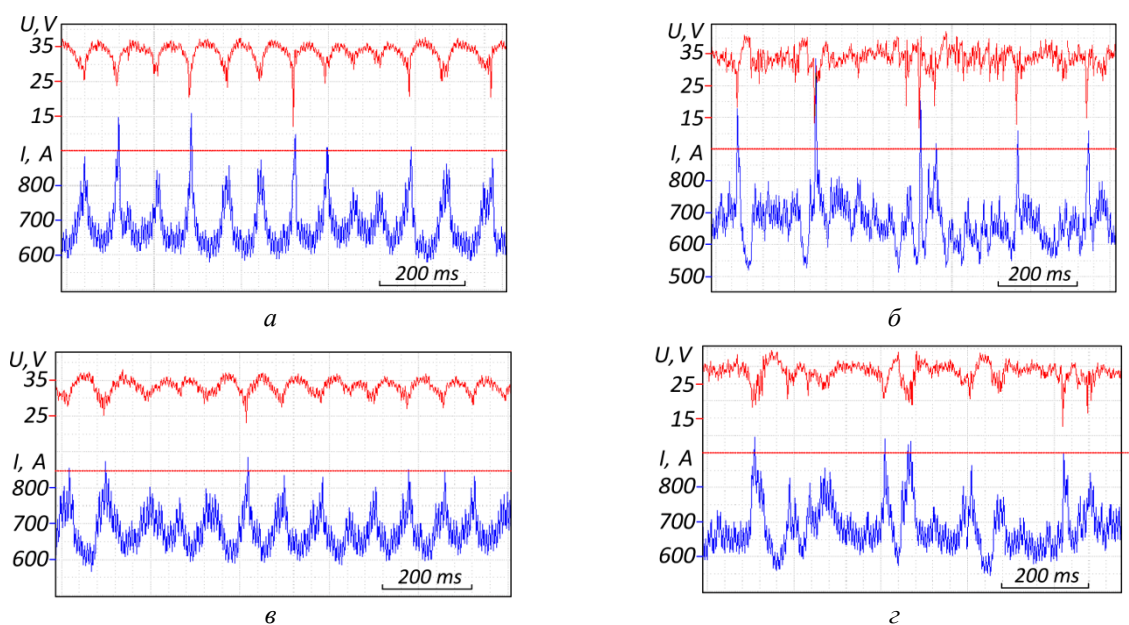


Рис. 3. Изменение силы сварочного тока $I_{св}$ и напряжения на дуге $U_{д}$ при наплавке под флюсами ОК 10.92 (а), ОК 10.16 (б), UF-S (в), ФЦ-18 (г) на постоянном токе прямой полярности

С учетом ранее полученных в работе [9] результатов выявлено, что при наплавке по схеме «углом вперед» угол наклона электрода (α) оказывает наибольшее влияние на размеры валика наплавленного металла и долю участия в нем основного металла при скоростях наплавки до 24 м/ч. С увеличением напряжения на дуге при межэлектродном расстоянии (b) 8 мм ширина наплавленного валика увеличивается тем больше, чем больше угол наклона расщепленного электрода (рис. 5, а).

С повышением межэлектродного расстояния до 12 мм ширина валика наплавленного металла наиболее интенсивно увеличивается в диапазоне $U_{д} = 33\text{--}39$ В без использования накло-

на электрода и в меньшей степени при его наклоне на угол 30° . Характерно, что с уменьшением напряжения на дуге до 33 В ширина наплавленного валика увеличивается только при значениях $\alpha \leq 10^\circ$ (рис. 5, б). Таким образом, при $b = 12$ мм наклон электрода целесообразен только при использовании напряжения на дуге до 33 В. Такая особенность процесса связана с тем, что при увеличении межэлектродного расстояния с 8 до 12 мм сила электродинамического взаимодействия между дугами уменьшается в 2 раза, что создает условия для отдельного существования дуг на электродных проволоках. Это приводит к изменению гидродинамического течения металла в передней

части сварочной ванны и нарушает формирование общей сварочной ванны. Характерная для

этого случая форма проплавления показана на рис. 4, *з*.

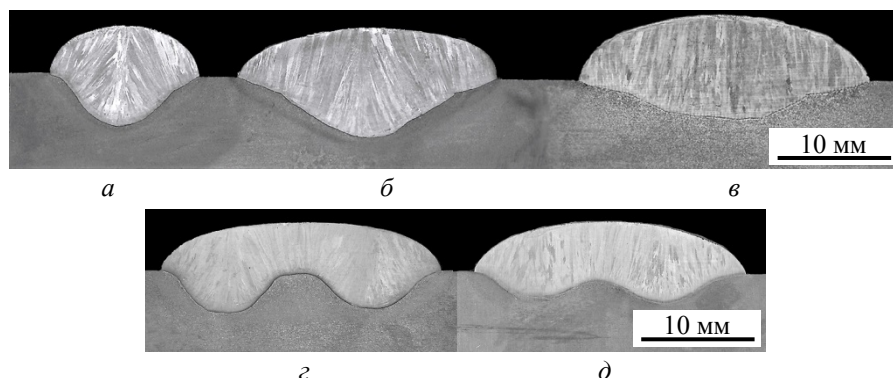


Рис. 4. Макросечение металла, наплавленного одной электродной проволокой (*а*) и расщепленным электродом при: $b = 8$ мм и $\alpha = 0^\circ$ (*б*); $b = 8$ мм и $\alpha = 20^\circ$ (*в*); $b = 12$ мм и $\alpha = 0^\circ$ (*г*); $b = 12$ мм и $\alpha = 20^\circ$ (*д*)

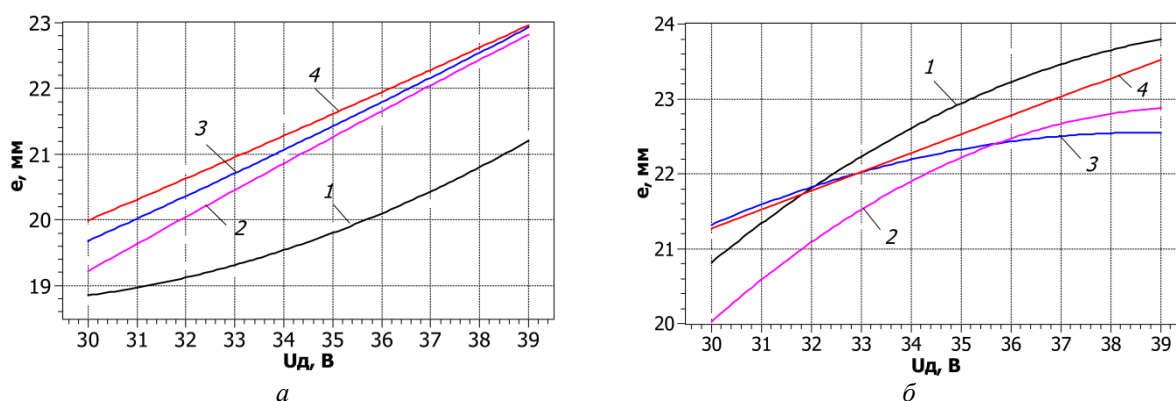


Рис. 5. Зависимости ширины наплаваемого валика e от угла наклона электрода α и напряжения на дуге U_d при межэлектродных расстояниях $b = 8$ мм (*а*) и $b = 12$ мм (*б*): 1 – без наклона электрода; 2; 3; 4 – наклон электрода 5° ; 10° и 30° соответственно

Исследованиями макро- и микроструктуры хорошо сформированного металла (рис. 6), наплавленного на оптимальном режиме с использованием флюса ОК 10.16, установлено, что в нем и в металле переходной зоны отсутствуют сварочные дефекты в виде горячих и холодных трещин, нет микропор и шлаковых включений.

Структура наплавленного металла представляет собой дендриты легированного γ -твердого раствора, в промежутках между которыми распо-

ложена эвтектика (~ 5 об.%), состоящая из интерметаллидных фаз Ni_4Mo и $Nb_{0.1}Ni_{0.9}$, образование которых характерно для неравновесных условий кристаллизации (рис. 7, *а*). В металле, наплавленном под флюсами ФЦ-18, ОК 10.92 и UF-S существенных изменений структуры не произошло, однако он характеризуется наличием неметаллических включений типа $(Si, Al)O_2$ размером 1–3 мкм, что нежелательно для эксплуатации наплавленного изделия (рис. 7, *б*).

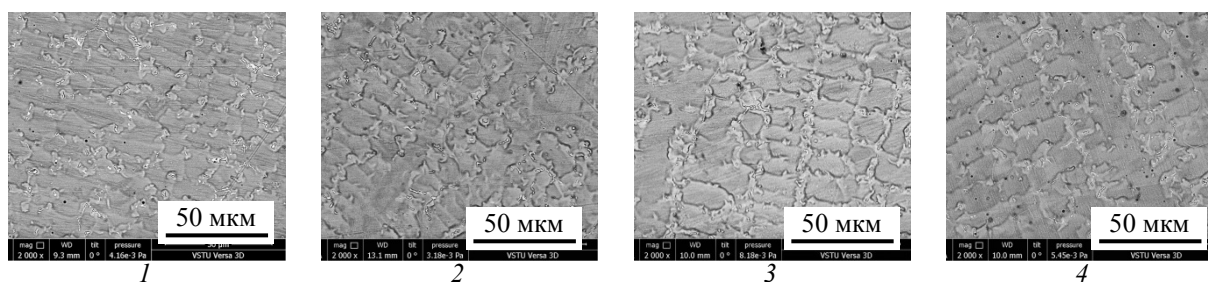


Рис. 6. Микроструктуры металла, наплавленного с использованием флюсов: ОК 10.92 (*1*), ОК 10.16 (*2*), ФЦ-18 (*3*) и UF-S (*4*)

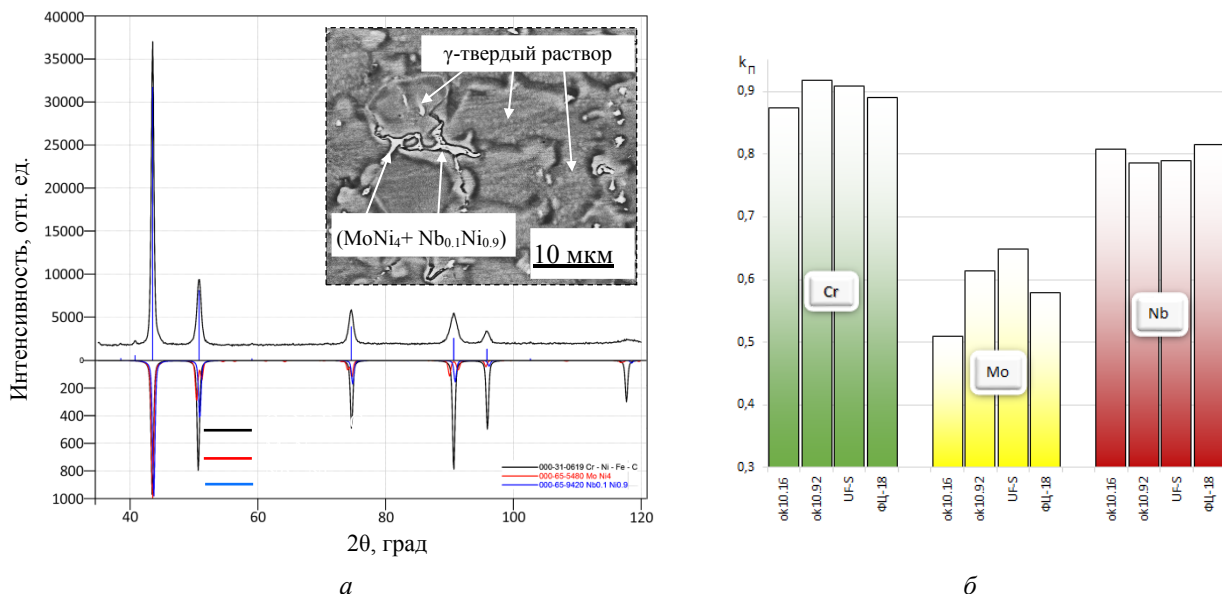


Рис. 7. Типичный фазовый состав (а) металла и распределение коэффициента перехода (б) легирующих элементов в наплавленный металл, под различными флюсами

При оценке твердости металла на образцах, наплавленных под флюсами различных составов не выявлено существенных отличий в изменении ее значений. В зоне термического влияния среднее значение твердости составляет 80,5 HRB, а в наплавленном металле – 83 HRB. Значения твердости при наплавке под флюсами различных составов не выявило больших отличий. Таким образом, можно предположить, что химический состав исследуемых флюсов не оказывает существенного влияния на уровень механических свойств наплавленного металла.

Выводы

1. Экспериментальные исследования процесса наплавки расщепленным электродом на прямой полярности показали большую зависимость коэффициента перехода легирующих элементов в наплавленный металл от устойчивости дугового процесса, чем от химической активности шлаковой системы. Это способствует достижению наибольших коэффициентов перехода хрома и молибдена в металл, наплавленный под флюсами кальциево-силикатного типа (UF-S, ОК 10.92) по сравнению с высокоосновными флюсами (ФЦ-18, ОК 10.16).

2. Установлено, что в условиях наплавки расщепленным электродом с использованием флюсов различных шлаковых систем в наплавленном металле системы Ni–Cr–Mo–Nb формируется химически однородная структура легированного γ-твердого раствора, содержащего (до 5 об.%) количество интерметаллидных фаз,

что обеспечивает достижение требуемого уровня его механических свойств.

3. Для обеспечения формирования качественного и широкослойного (до 25 мм за один проход) наплавленного металла с долей участия основного металла не превышающей 30–33 %, угол наклона расщепленного электрода от вертикальной плоскости следует выбирать в пределах 10–30 ° (для b = 8 мм – 10 °, для b = 12 мм – 30 °).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. S. Pak, S. Rigdal, L. Karlsson, A. Gustavsson Electroslag and submerged arc stainless steel strip cladding // Anti-Corrosion Methods and Materials. – 1998. – Vol.45. – № 1. – p. 41–47.
2. J. Ślania, R. Krawczyk, S. Wójcik Quality requirements put on the Inconel 625 austenite layer used on the sheet pile walls of the boiler’s evaporator to utilize waste thermally // Archives of Metallurgy and Materials. – 2015. – Vol.60, Is. 2. – С. 677–685.
3. Расчет режима дуговой наплавки колеблющимся электродом оправок трубопрокатного стана / В. Б. Литвиненко-Арьков, Г. Н. Соколов, В. И. Лысак, Ф. А. Кязымов // Сварка и диагностика. – 2010. – № 5 (сентябрь–октябрь). – С. 20–24.
4. Норин, А. П. Наплавка дугой косвенного действия с применением плавящихся проволочных электродов / А. П. Норин, А. А. Кириянов, Н. Н. Малышев // Сварочное производство. – 1990. – № 6. – С. 3–4.
5. Мандельберг, С. Л. Магнитное взаимодействие дуг при двухдуговой трехфазной сварке / С. Л. Мандельберг // Автоматическая сварка. – 1966. – № 4. – С. 30–36.
6. Мастенко, В. Ю. Высокопроизводительная механизированная двухэлектродная наплавка проволоками под флюсом с подачей дополнительной заземленной проволоки в зону горения дуги / В. Ю. Мастенко // Сварочное производство. – 2007. – № 8. – С. 3–6.
7. Меликов, В. В. Многоэлектродная наплавка / В. В. Меликов. – М. : Машиностроение, 1988. – 143 с.

8. *Медовар, Б. И.* Об автоматической сварке расщепленным электродом / Б. И. Медовар, А. Г. Потапьевский // Автоматическая сварка. – 1955. – № 3.

9. Технологические особенности формирования металла, наплавленного расщепленным электродом / С. К. Елсуков,

И. В. Зорин, Г. Н. Соколов, Ю. Н. Дубцов, Т. Р. Литвинова, С. А. Фастов, В. А. Фетисов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 10 (205) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2017. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 122–125.