УДК 621.791

В.Д. Кузнецов, д-р техн. наук, проф., **И.В. Смирнов,** д-р техн. наук, проф.,
К.П. Шаповалов, инж.
Национальный технический университет Украины «КПИ», Украина
ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод», Украина
Тел./Факс: +38 (044) 406-82-42; E-mail: v.kuznetsov@kpi.ua

ВЛИЯНИЕ НАНОДОБАВОК НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА МЕТАЛЛА ШВОВ ПРИ СВАРКЕ ВЫСОКОПРОЧНЫХ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

В статье приведены данные по сравнительной оценке структур и свойств металла швов низколегированных высокопрочных сталей при введении в сварочную ванну нанооксидов различного состава и объемных долей. Установлено, что при изменении объемной доли нанооксида алюминия от 0,5% до 4,5% наиболее эффективное влияние на структуру имеет место при его введении в сварочную ванну в количестве 0,5 об.%. Основным признаком такой структуры является высокая степень измельчения и дисперсность составляющих. Показано, что при разработанной технологии сварки низколегированных высокопрочных сталей, представляется возможным использование более дешевых отечественных сварочных материалов взамен импортных.

Ключевые слова: *сварка, низколегированные высокопрочные стали, структура, технология, нанооксиды*

Введение

Возможности повышения уровня механических характеристик сварных соединений легированных и низколегированных сталей путем подбора соответствующих сварочных материалов и режимов термической обработки конструкций близки к исчерпанию. Последующий прогресс в решении этой задачи может быть достигнут путем применения новых методов управления структурой металла шва, которые используют эффекты влияния на показатели прочности и пластичности основных упрочняющих факторов, таких как размеры зерна, морфология, дисперсность и объемная доля вторичных фаз, плотность и распределение неметаллических включений.

Анализ исследований и публикаций последних лет показывает, что одним из основных структурных элементов формирующих строение железоуглеродистых сплавов являются наноразмерные составляющие, введение которых в незначительных количествах позволяет существенно влиять на структурообразование и механические свойства металла шва [1–6].

Авторами [1,2] экспериментально установлено влияние размера неметаллических включений на гетерогенное зарождение структуры игольчатого феррита (ИФ), способной обеспечить прочностные характеристики металла швов с высоким уровнем вязкости. В работе [3] сделан вывод, что в металле швов с повышенным содержанием титана и бора образование оксидов и нитридов титана способствует зарождению ИФ. В [4] сообщается, что выделения MnS и TiN на уже существующих включениях Ti_2O_3 служат также центрами зарождения ИФ. Интересные данные приводятся в работе [5] о том, что вкрапления Ti_2O_3 являются инертными в сталях, которые не содержат марганец и достаточно активными в сталях легированных марганцем. Образование ИФ в последнем случае объясняется формированием частиц

$(Ti,Mn)_2O_3$ и наличием участков обедненных марганцем в результате абсорбции атомов марганца из окружающей матрицы. В работе [6] также приведен анализ и рассмотрены методы использования наночастиц тугоплавких соединений в процессе модифицирования сварных соединений крупногабаритных конструкций, выполненных автоматической сваркой под слоем флюса.

Таким образом, для формирования мелкодисперсной микроструктуры сварных швов с повышенными физико-механическими характеристиками необходимо обеспечить образование в металле включений прогнозируемых по объемной доле, составу и размерам.

Анализ литературы указывает на использование нанодобавок как ресурс формирования структур с повышенными механическими свойствами, что является актуальным при изготовлении ответственных изделий из низколегированных высокопрочных сталей.

Так например, роторы тягодутьевых радиальных машин являются одной из номенклатурных групп продукции Новокраматорского машиностроительного завода, для которых используется низколегированная высокопрочная сталь А–514 с $\sigma_т$=710 МПа и $\sigma_в$=782 МПа, изготовленная на комбинате «Азовсталь» согласно требованиям Американского стандарта ASTM A514/A514M-94A.

Выбор материала предопределен условиями работы изделий, которые применяются в процессах агломерации и обжига железорудных окатышей. В процессе работы, элементы ротора испытывают значительные центробежные нагрузки и их прочность должна гарантированно обеспечивать целостность конструкции, включая повышенные требования к качеству сварных соединений. Выполнение этих требований удорожает производство, так как вынуждает использовать более дорогие импортные материалы, например, сварочную проволоку BÖHLER NiCrMo 2,5-IG взамен отечественной проволоки Св-10ХН2ГСМФТЮ. Выполненные на предприятии испытания показали, что при сварке проволокой BÖHLER NiCrMo 2,5-IG механические свойства выше и соответствуют $\sigma_т$ > 690 МПа и $\sigma_в$=760–895 МПа.

В то же время, формирование структуры с нанодобавками требует поиска рациональных схем их ввода в сварочную ванну из-за комплекса физико-химических свойств нанодисперсных порошков: низкого смачивания жидким металлом, что особенно важно для выполнения роли центров кристаллизации; высокой химической активности и пирофорности; начала процессов окисления при сравнительно низких температурах, что может привести к деактивации нанодисперсных частиц при нахождении в высокотемпературной зоне сварочной ванны.

На данное время известны несколько схем введения нанокомпонентов в сварочную ванну. В работе [7] рассмотрены способы введения небольшого (до 0,2 масс.%) количества наноразмерных частиц карбидов вольфрама в металл, наплавленный с использованием электродугового и электрошлаковых процессов. Отмечается, что измельчение структурных составляющих наплавленного металла может быть достигнуто введением частиц тугоплавких соединений в сварочные материалы или непосредственно в сварочную ванну [8].

Перечисленные особенности нанопорошков усложняют их использования как модификаторов в свободном виде. Для сохранения модифицирующей активности наночастицы необходимо прикрепить ее к макрочастице (микрохолодильнику), то есть создать комбинацию наночастицы+макрочастица.

Одним из способов решения этой задачи может быть использование механохимической обработки порошковой смеси макро- и наночастиц в специальных

высокоэнергетических планетарных мельницах. Механическая энергия, которая передается порошку при такой обработке, тратится на увеличение кинетической энергии атомов, на электронное возбуждение и ионизацию химических связей, на разрывы связей, на процессы массопереноса и таким образом, проявляется в виде тепла, образования новых поверхностей и дефектов кристаллической структуры. Все эти эффекты, будут способствовать образованию прочных химических связей между макро- и наночастицей.

Цель работы – экспериментальное исследование при сварке высокопрочных низколегированных сталей отечественными сварочными материалами структуры металла шва от состава и содержания нанопорошков оксидов при их вводе в сварочную ванну в виде порошковой смеси после механохимической обработки.

Основное содержание и результаты работы

Для проведения исследований использовали низколегированную сталь 09Г2С с предварительной облицовкой подготовленных под. сварку кромок. Облицовку кромок выполняли наплавкой сварочной проволокой Св-10ХГН2СМФТЮ, что при последующей сварке приближало основной метал по химическому составу близким до ряда низколегированных высокопрочных сталей.

В качестве нанокомпонентов применяли порошки оксида Al_2O_3 и комплексного оксида системы Al_2O_3–ZrO_2–YO_2 полученными по криохимической технологии. Нанокомпоненты вводились в сварочную ванну в виде порошков, которые содержали частицы нанооксидов в количестве 0,5, 2,5 и 4,5 % объемных долей, остальные чистое железо.

Сварку проводили с использованием аппарата АДФ 231 и полуавтомата КП 004 У3 на режимах: ток сварки I = 170–180А, напряжение дуги U = 25–27В, скорость сварки V = 12,5 м/год, расходы газа 8–9 л/год, вылет сварочной проволоки 15 мм. В качестве защитного газа применялась смесь 72% Ar + 28% CO_2.

Для сварки использовали проволоку марки 10ХГН2СМФТЮ, диаметром 1,2 мм Базовая система легирования данной проволоки (Mo, Ni, Cr) способствует повышению стойкости аустенита и расширению температурного интервала формирования бейнита, при этом в структуре металла шва изменений основных легирующих элементов по химическому составу существенно не происходит. Химический состав сварного шва приведен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав сварного шва

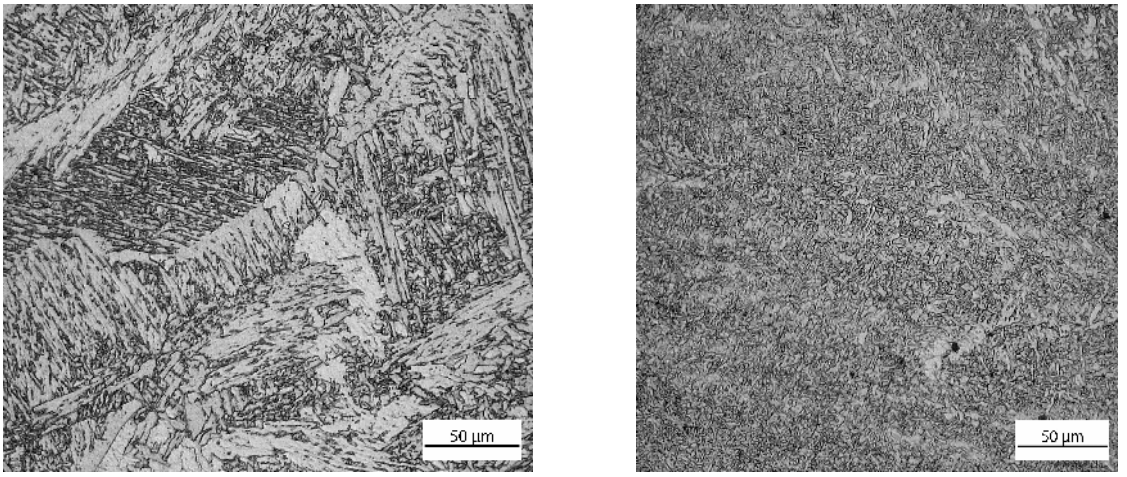
Элементы	C	Cr	Mn	Ni	Si	Mo	V	Ti	Al	P	S
Содержание,%	0,08	0,3	1,6	2,1	0,45	0,43	0,04	0,06	0,009	0,02	0,015

Введения нанооксидов в сварочную ванну проводили по технологической схеме, которая предусматривала закладку в разделку кромок пресовок полученных методами порошковой металлургии. В этом случае исследуемые нанокомпоненты не проходили через сварочную дугу. Каждую из прессовок с различным содержанием по объёмной доли нанооксидов укладывали последовательно по длине стыка, что исключало при сварке за один проход влияние на результат изменений в режимах сварки.

Результаты экспериментов показали, что в исходных условиях, без введения нанооксидов, в металле шва формируется структура, основными составляющими которой является выделение полигонального феррита, игольчатого и пластинчатого с упорядоченными и неупорядоченными фазами. Особенностью такой структуры является наличие крупных грубопластинчатых образований преимущественно

игольчатого феррита по границам зерен (рис. 1,а). Микротвердость составляющих изменяется соответственно от 145 до 187 МПа.

Добавление в качестве добавки нанооксида Al_2O_3 в количестве 4,5об.% приводит к изменению микроструктуры металла шва. На границах зерен остаются выделения игольчатого феррита, но более измельченных по размеру. Другими составляющими является феррит с упорядоченными вторичными фазами и внутризеренный феррит. Структура становится более измельченной в сравнении с исходной. Микротвердость составляющих изменяется соответственно от 188 до 236 МПа.



а) б)

Рис. 1. Микроструктура исходного шва (а) и при введении нанооксида Al_2O_3 в количестве 0,5 об.% (б)

Микроструктура металла шва при введении нанооксида Al_2O_3 в количестве 2,5 об.% преимущественно имеет структуру игольчатого феррита и феррита с упорядоченными и неупорядоченными вторыми фазами. Микротвердость составляющих практически не изменяется и составляет 180-189 МПа.

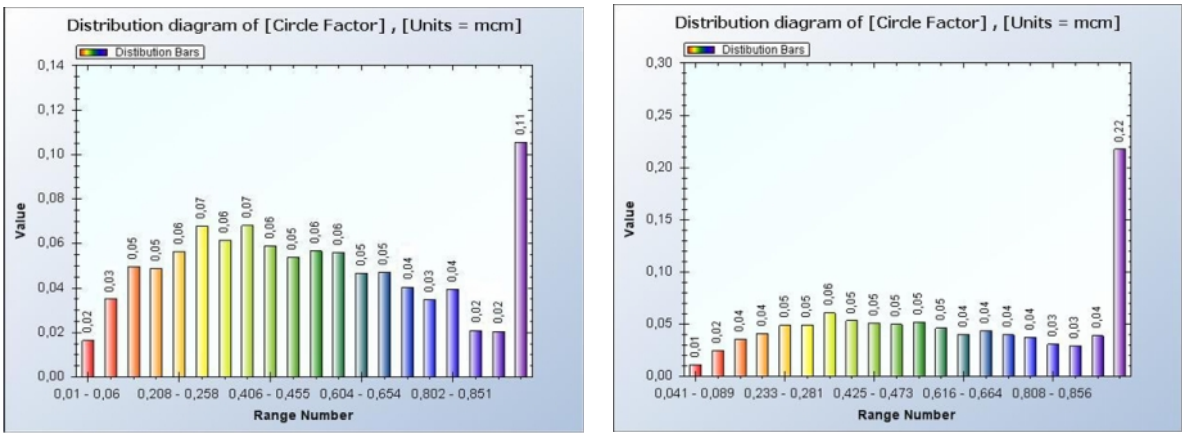
Микроструктура металла шва при введении нанооксида Al_2O_3 в количестве 0,5 об.% имеет измельченную дисперсную структуру, которая преимущественно состоит из верхнего бейнита, частично нижнего и игольчатого феррита (рис. 1, б). Микротвердость составляющих составляет 264–304 МПа.

При введении комбинированного нанооксида, состоящего из комплексного оксида алюминия, циркония и иттрия в соответствующем количестве формируется дисперсная структура игольчатого феррита и феррита с неупорядоченными вторичными фазами. Микротвердость составляющих изменяется соответственно от 189 до 202 МПа.

Таким образом, анализ микроструктур свидетельствует о существенном влиянии нанооксидов, как на характер выделения фаз, их состав, так и размеры. Изменение форм и размеров структурных составляющих, подтверждается также данными количественной металлографии.

По результатам количественного металлографического анализа микроструктур сварных швов определяли распределение структурных составляющих по размеру и по параметру «фактора формы», характеризующего степень приближенности к правильной сферической форме. Данный параметр определялся, как $N = d_1/d_2$, где d_1 и d_2 – взаимно перпендикулярные размеры зерна.

Геометрические измерения структурных составляющих сварных швов проводили по электронными снимкам микроструктур полученным на растровом электронном микроскопе РЕМ 106i, используя компьютерную программу обработки изображений ImageLab 1.0. Результаты программной обработки микроструктур сварных швов до и после введения в сварочную ванну частиц нанооксида Al_2O_3 представлены на рис. 2.



а) б)

Рис. 2. Распределение структурных составляющих в сварном шве в зависимости от «фактора формы» а) без добавок; б) при введении нанооксида Al_2O_3 в количестве 0,5 об.%

Из полученных данных (рис. 2,а) видно, что в сварном шве без добавок нанооксидов количество структурных составляющих форма которых приближается к окружности (N≈1) составляет 11%. При этом, количество структурных составляющих, имеющих наибольшее значение N=0,3–0,4 составляет 7%. После введения в сварочную ванну нанооксида Al_2O_3 количество структурных составляющих, имеющих N≈1, увеличивается до 22%, то есть в 2 раза. При этом количество структурных составляющих, имеющих фактор формы N=0,3–0,4 уменьшается до 6%.

Из анализа полученных результатов (рис. 2,3) можно сделать вывод, что введение в сварочную ванну нанооксида Al_2O_3 в количестве 0,5% приводит к получению мелкозернистой микроструктуры с более округлой формой структурных составляющих, среди которых в соответствии с микроструктурой наибольшую часть занимает верхний бейнит. Образование данной структуры способствует повышению физико-механических свойств сварных швов, что в свою очередь полностью коррелирует с данными измерение твердости (рис. 3).

Таким образом, исследования влияния нанооксидов на формирование структуры сварных швов свидетельствуют о значительных изменениях формы и размеров структурных составляющих. Из результатов металлографических исследований следует, что влияние неметаллических включений на микроструктуру швов зависит не только от их химического состава, но также от их размеров и плотности распределения в металлической матрице [9].

Известно, что энергетический барьер гетерогенного зарождения феррита на включениях значительно снижается с увеличением диаметра включения в диапазоне от 0 до 1 мкм, что связано с увеличением поверхности частиц. Другой важной

характеристикой, которая определяет возможность получения мелкозернистой микроструктуры с высокой частью ИФ, является количество включений, которые могут служить центрами зарождения феррита в стали. Для оценки роли включений на формирование структуры сварных швов проведены специальные исследования по изучению их химического состава, размеров и плотности выделений в металлической матрице. Было установлено, что в случае введения в расплав сварочной ванны нанооксидов, среднестатистическое значение количества неметаллических включений соответствует 30 на площади 324 мкм, то есть 1 включение встречается в среднем на отрезке длиной 10 мкм [9].

Полученные данные по структурным изменениям, особенностям состояния фазовых выделений в условиях сварки с введением в сварочную ванну нанооксидов является объективной посылкой для изменения механических свойств металла швов. Измерения твердости по Виккерсу показали, что в зависимости от содержания нанооксидов значения твердости увеличиваются (рис. 3).

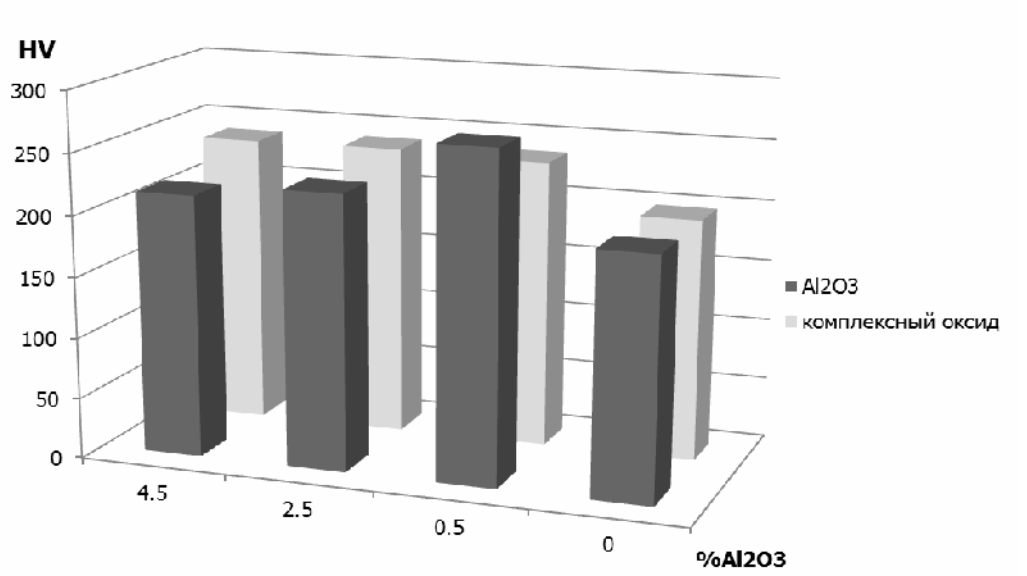


Рис. 3. Изменение твердости сварных швов в зависимости от количества вводимых нанооксидов

Изменение твердости присуще всем опытным образцам, при этом максимальное повышение твердости до 270HV наблюдается в металле шва, в случае введения нанооксида алюминия в количестве 0,5% объемных долей.

Полученные данные были сопоставлены с результатами замеров микротвердости при сварке в условиях Новокраматорского машиностроительного завода стали А–514 проволокой BÖHLER NiCrMo 2,5-IG. При этом, измерение твердости проводилось в различных зонах сварного соединения, значения которой приведены в табл.2.

Таблица 2. Твердость зон сварного соединения

Сварочные материалы	Твердость зон сварного соединения, кГс/мм^2		
	Сварной шов	Зона крупного зерна	Основной металл
BÖHLER NiCrMo 2,5-IG	254…274	274	236
Св-10ХГН2СМФТЮ +0,5% Al_2O_3	264…281	275	230

Как следует из данных (табл. 2) твердость металла сварного шва при использовании отечественной сварочной проволоки с нанооксидом превышает значения твердости при использовании проволоки BÖHLER NiCrMo 2,5-IG. Согласно [10] указанным значениям твердости соответствует $\sigma_в$= 925 МПа, что дает предпосылки для применения разработанной технологии при сварке сталей с более высоким уровнем предела прочности.

Таким образом, применение при сварке высокопрочных низколегированных сталей добавок нанооксидов существенно влияет на структуру металла швов и их механические характеристики. При этом, представляется возможность использования при сварке данного класса сталей отечественных сварочных материалов, что снижает себестоимость изготовления изделий.

Выводы

1. Разработана схема введения нанооксидов в сварочную ванну, которая отличается тем, что методами порошковой металлургии предварительно изготовляются спеченные прессовки определенной длины и диаметра с соответствующей объемной долей нанопорошков. Спеченные прессовки закладываются в разделку кромок перед сваркой. В этом случае нанокомпоненты не проходят через сварочную дугу, а попадают в расплав ванны при плавлении прессовок.

2. Установлено, что в зависимости от количества и состава неметаллических включений в металле сварных швов формируется разный тип микроструктуры от различных морфологических форм феррита до верхнего и нижнего бейнита. Показано, что образованию бейнитной структуры с высокими показателями прочности более способствует введение в сварочную ванну нанооксида алюминия, чем комплексного оксида состоящего из оксидов алюминия, циркония и иттрия.

3. Установлено, что при изменении объемной доли нанооксида алюминия от 0,5% до 4,5% наиболее эффективное влияние на структуру имеет место при его введении в сварочную ванну в 0,5 об.%. Основным признаком такой структуры является, высока степень измельчения и дисперсность составляющих.

4. Показано, что использование технологии сварки низколегированных высокопрочных сталей с введением в сварочную ванну нанооксидов позволяет при производстве металлоконструкций использовать более дешевые отечественные сварочные материалы.

Список литературы:

1. Походня І.К. Дослідження впливу нанорозмірних карбідів титану на формування мікроструктури та властивостей зварного шва / І.К. Походня, В.В. Головко, С.М. Степанюк, Д.Ю. Єрмоленко // ФХММ. – 2012.– № 6.– С. 68-75.

2. Головко В.В. Дослідження впливу наноутворень в металі на формування мікроструктури зварного шва та його механічні властивості / В.В. Головко, С.М. Степанюк, Д.Ю. Єрмоленко // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. трудов. – 2012. – Вып. 64. – С.155-159.

3. Thewlis G. Transformation kinetics of ferrous weld metals / G. Thewlis // Mater. Sci. Technol. – 10(1994). – P. 110-125.

4. Горынин И.В. Принцип легирования, фазовые превращения, структура и свойства хладостойких сварных строительных сталей / И.В Горынин, В.В. Рыбин, В.А Рисышевский, Е.И. Хлусова // МиТОМ. –2007. – № 1. – С. 9-15.

5. Byun J.S. Non-metallic inclusion and intragranular nucleation of ferrite in Ti-killed C-Mn el / J.S. Byun, J.H. Shim, Y.W. Cho and D.N. Lee // Acta Mater. – 51 (2003) – P. 1593–1606.

6. Гущин Д.А. Анализ и поиск перспективных направлений комплексного модифицирования металла сварных швов при автоматической сварке под флюсом мостовых металлоконструкций / Д.А. Гущин, В.Г. Гребенчук, И.В. Гребенчук // Научные труды ОАО ЦНИИС. – Выпуск №261.– С.18-25.

7. Соколов Г.Н. Модифицирование структуры наплавленного металла нанодисперсными карбидами вольфрама / Г.Н. Соколов, И.В. Лысак, А.С. Трошков и др.// Физика и химия обработки материалов. – 2009. – №6.– С.18-25.

8. Вайнерман А.Е. Аргонодуговая наплавка порошков на основе карбида вольфрама на сталь для получения износостойких покрытий / А.Е. Вайнерман, Н.В. Беляев // Вопросы материаловедения. – 2002. – №2. – С. 43-46.

9. Кузнецов В.Д. Вплив модифікування наночастинками оксидів на структуроутворення зварних швів низьколегованих сталей / В.Д. Кузнецов, І.В. Смирнов, Д.В. Степанов, К.П. Шаповалов // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». Луцьк. – 2013. – Випуск № 41 Ч. 2. – С. 61-68.

10. Морозов А.С., Ремнева В.В., Тонких ГЛ. и др. Организация и проведение обследования технического состояния строительных конструкций зданий и сооружений. – М.: 2001. – 212 с.

V.D Kuznetsov, I.V. Smirnov, K.P. Shapovalov

INFLUENCE OF NANADDITIONS ON STRUCTURE AND PROPERTIES OF WELD METAL AT LOW-ALLOYED HIGH-TENSILE STEELS WELDING

In article a comparative estimation of structures and properties of low-alloyed high-tensile steels metal welds in conditions of adding into the weld pool a nano oxides with various content and volume fractions are dated. It is fixed, that changes of aluminum nano oxides volume fraction from 0,5 % to 4,5 % the most effective influence on structure takes place at its adding into the weld pool in a volume fraction of 0,5 %. The basic sign of such structure is high degree of size reduction and dispersion of components. It is shown, that at the developed technology of welding low-alloyed high-tensile steels is obviously possible to use cheaper domestic consumables instead of import.

Key words: *welding, low-alloyed high-tensile steels, structure, technology, nano oxides.*

В.Д. Кузнецов, И.В. Смирнов, К.П. Шаповалов

ВПЛИВ НАНОДОБАВОК НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ МЕТАЛУ ШВІВ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ВИСОКОМІЦНИХ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ

У статті приведені дані за порівняльною оцінкою структур і властивостей металу швів низьколегованих високоміцних сталей при введенні в зварювальну ванну нанооксидів різного складу і об'ємних частин. Встановлено, що в наслідок зміни об'ємної частки нанооксиду алюмінію від 0,5% до 4,5% найбільш ефективний вплив на структуру має місце при його введенні в зварювальну ванну в кількості 0,5 об.%. Основною ознакою такої структури є висока міра подрібнення і дисперсність складових. Показано, що при розробленій технології зварювання низьколегованих високоміцних сталей представляється можливим використання дешевших вітчизняних зварювальних матеріалів замість імпортних.

Ключеві слова: *зварювання, низьколеговані високоміцні стали, структура, технологія, нанооксиди.*

Надійшла до редколегії 30.05.2013 р.