

УДК 519.87:669.1

МОДИФИЦИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СВАРНЫХ ШВОВ ВЫСОКОПРОЧНЫХ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ НАНОЧАСТИЦАМИ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ

КОСТИН В. А.¹, *д.т.н.*

ГРИГОРЕНКО Г.М.¹, *академик НАНУ*

ЖУКОВ В.В.¹, *мл.н. с.*

¹ Отдел физико-химических методов исследований материалов, Институт электросварки им. Е.О.Патона, ул. Боженко, 11, 03680, Киев-150, Украина, тел. +38 (068) 434-34-22, e-mail: office_22@ukr.net

Аннотация. Цель. Целью работы являлось исследовать влияние нанодисперсных частиц тугоплавких металлов на кристаллизацию жидкого металла сварочной ванны и кинетику превращения аустенита в металле швов высокопрочных низколегированных сталей. В работе представлены результаты исследований структуры металла швов высокопрочной низколегированной стали 14ХГНДЦ, в расплав которой вводились нанопорошковые частицы различных тугоплавких соединений – оксидов, карбидов и нитридов (TiC, TiN, SiC, VC, NbC, TiO₂, Al₂O₃, MgO, ZrO₂). Выполненные исследования показали эффективность применения наноксидов титана TiO₂ и циркония ZrO₂, что позволило обеспечить высокие значения механических свойств металла сварных швов (σ_b - 708 МПа и 621 МПа, KCV₋₂₀ - 60 Дж/см² и 72,9 Дж/см², δ – 21 и 19%), за счет формирования комплекса бейнитных и игольчатых структур. Использование установки имитации термических циклов Gleeble 3800 позволило установить взаимосвязь между температурными интервалами превращения, количеством структурных составляющих и типом модифицирующих наночастиц. **Научная новизна.** Модифицирование металла швов наночастицами оксидов титана TiO₂ и циркония ZrO₂ приводит к развитию превращения в высокотемпературной области образования бейнита с образованием игольчатого феррита, который обладает благоприятным комплексом прочностных, пластических и вязких свойств. Карбиды TiC, SiC и нитриды TiN, NbN снижая температуру начала образования бейнита приводят к образованию бейнитно-мартенситных структур (нижнему бейниту, микрофазам, МАК-фазе), которые обладают пониженными вязкими и пластическими свойствами. Соединения VN, VC и ZrC хорошо растворимы в жидком металле сварочной ванны и, вследствие этого, они малопригодны в качестве эффективных модификаторов структуры металла швов. **Практическое значение.** Результаты работы будут использованы для повышения эксплуатационных свойств сварных соединений ВПНЛ сталей.

Ключевые слова: электродуговая сварка, слиток металла шва, нанопорошковые инокуляторы, диаграмма распада аустенита, микроструктура.

МОДИФІКУВАННЯ СТРУКТУРИ ЗВАРНИХ ШВІВ ВИСОКОМІЦНИХ НИЗКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ НАНОЧАСТИНКАМИ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛІВ

КОСТІН В. А.¹, *д.т.н.*

ГРИГОРЕНКО Г.М.¹, *д.т.н., академік НАНУ*

ЖУКОВ В.В.², *мол.н. с.*

¹ Відділ фізико-хімічних методів дослідження матеріалів, Інститут електросварювання ім. Є.О.Патона, вул. Боженко, 11, 03680, Київ-150, Україна, тел. +38 (068) 434-34-22, e-mail: office_22@ukr.net

Анотація. Мета. Метою роботи було дослідити вплив нанодисперсних частинок тугоплавких металів на кристалізацію рідкого металу зварювальної ванни і кінетику перетворення аустеніту в металі швів високоміцних низьколегованих сталей. У роботі представлені результати досліджень структури металу швів високоміцної низьколегованої сталі 14ХГНДЦ, в розплав якої вводилися нанопорошкові частки різних тугоплавких сполук - оксидів, карбідів і нітрідів (TiC, TiN, SiC, VC, NbC, TiO₂, Al₂O₃, MgO, ZrO₂). Виконані дослідження показали ефективність застосування наноксидів титану TiO₂ і цирконію ZrO₂, що дозволило забезпечити високі значення механічних властивостей металу зварних швів (σ_b - 708 МПа і 621 МПа, KCV₋₂₀ - 60 Дж / см² і 72,9 Дж / см², δ - 21 і 19%), за рахунок формування комплексу бейнітне і голчастих структур. Використання установки імітації термічних циклів Gleeble 3800 дозволило встановити взаємозв'язок між температурними інтервалами перетворення, кількістю структурних складових і типом модифікуючих наночастинок. **Наукова новизна.** Модифікування металу швів наночастинками оксидів титану TiO₂ і цирконію ZrO₂ призводить до розвитку перетворення в высокотемпературній області освіти бейніта з утворенням голчастого фериту, який володіє сприятливим комплексом міцнісних, пластичних і'язких властивостей. Карбіди TiC, SiC і нітриди TiN, NbN знижуючи температуру початку освіти бейніта призводять до утворення бейнітне-мартенситних структур (нижньому бейніта, мікрофази, МАК-фазі), які володіють зниженими гнучкими і пластичними властивостями. З'єднання VN, VC і ZrC добре

розчинні в рідкому металі зварювальної ванни і, внаслідок цього, вони малопридатні в якості ефективних модифікаторів структури металу швів. **Практична значимість.** Результати роботи будуть використані для підвищення експлуатаційних властивостей зварних з'єднань ВПНЛ сталей.

Ключові слова: електродугове зварювання, злиток металу шва, нанопорошкові інокулятори, діаграма розпаду аустеніту, мікроструктура.

MODIFICATION THE WELD METAL STRUCTURE OF HSLA STEELS BY REFRACTORY NANOPARTICLES

KOSTIN V. A.¹, DR. SC. (TECH.),

GRIGORENKO G.I.¹, DR. SC. (TECH.), Academician NANU

ZUKOV V.V.¹, Jr. SC. (TECH.),

¹ Department of physical and chemical methods of research materials, PWI, st. Bozenko, 11, 03680, Kiev-150, Ukraine, tel. +38 (068) 434-34-22, e-mail: office_22@ukr.net.

Abstract. Purpose. The aim of study was to investigate the impact of nano-dispersed particles of refractory metals in the molten metal of the weld pool and the crystallization kinetics of austenite in the metal joints of high-strength low-alloy steels. The results of studies of the metal structure of high-strength low-alloy steel joints 14HGNDTS, which were introduced into the melt. Nanopowder particles of various refractory compounds - oxides, nitrides and carbides (TiC, TiN, SiC, VC, NbC, TiO₂, Al₂O₃, MgO, ZrO₂). The studies showed the effectiveness of nanooxides TiO₂ titanium and zirconium ZrO₂, thus ensuring high values of the mechanical properties of the weld metal (Rm -708 MPa and 621MPa, KCV₋₂₀ - 60 J / cm² and 72.9 J / cm², δ - 21 and 19%), due to the formation of the complex and needle bainitic structures. Using Gleeble 3800 installation simulating thermal cycles it possible to establish the relationship between the temperature conversion interval, the number of structural components and the type of modifying nanoparticles. **Originality.** Modification of metal nanoparticles seams titanium and zirconium oxide ZrO₂ TiO₂ leads to the development of transformation at high temperatures to form bainite acicular ferrite, which complex has a favorable strength, plastic and viscous properties. Carbides TiC, SiC and nitrides of TiN, NbN lowering the bainite start temperature lead to the formation of bainitic-martensitic structures (lower bainite, microphase MAK-phase), which have reduced viscous and plastic properties. Compounds of VN, VC and ZrC are readily soluble in the molten metal of the weld pool and therefore, they are of little use as effective metal structure modifiers seams. **Practical value.** The results will be used to enhance the performance properties of HSLA steel welded joints.

Keywords: arc welding, the weld metal ingot, nanopowder inoculators, decomposition of austenite, microstructure

Введение

В настоящее время задача повышения надежности и работоспособности строительных конструкций широкого назначения определяется в основном надежностью их сварных соединений. Широкое применение в трубо- и газопроводном транспорте, строительстве, машиностроении высокопрочных низколегированных сталей (ВПНЛ), обусловлено относительно низкой себестоимостью затрат на их производство при высоких показателях механических свойств. Повышение уровня прочности этих сталей до величины 700...800...900 МПа (стали X80, X90, X100) значительно расширяет возможности и перспективы их использования в сварных конструкциях.

Решение проблемы снижения свойств сварных соединений ВПНЛ сталей можно достичь путем целенаправленного управления процессами кристаллизации жидкого металла, процессами фазовых превращений, параметрами зеренной структуры, неметаллических включений и фаз.

Одним из перспективных способов управления процессами кристаллизации жидкого металла при сварке и литье является использование тугоплавких частиц наноразмерного (≤ 100 нм) диапазона [1-3].

Использование крупных частиц (размером >10 мкм) в металлургии производства сталей и сплавов достаточно хорошо известно [4]. Однако использование нанодисперсных частиц для управления структурой металла при электродуговых способах сварки вызывает ряд трудностей. Необходимо: обеспечить их однородное распределение по объему жидкого металла; предотвратить их удаление из расплава, вследствие всплытия или взаимодействия с флюсом; обеспечить достаточную смачиваемость расплавом, предохранить от коагуляции, растворения и окисления в процессе сварки.

Предыдущие исследования [5] показали, что автоматическая дуговая сварка может быть использована в качестве адекватной физической модели для изучения процессов кристаллизации и развития фазовых превращений в свариваемом металле, результаты которой могут быть применены для традиционной металлургии производства стали.

Цель

Целью работы является исследовать влияние нанодисперсных частиц тугоплавких металлов на кристаллизацию жидкого металла сварочной ванны и

кинетику превращения аустенита в металле швов высокопрочных низколегированных сталей.

Методика

В работе представлены результаты исследований структуры сварных соединений высокопрочной низколегированной стали 14ХГНДЦ, в расплав которой вводились нанопорошковые частицы инокуляторы (НПИ) различных тугоплавких соединений – нитридов, карбидов и оксидов различных металлов (TiC, TiN, SiC, VC, NbC, TiO₂, Al₂O₃, MgO, ZrO₂). Модифицирование жидкого металла частицами инокуляторами осуществлялось посредством электродуговой сварки, путем использования порошковых сварочных проволок в сердечник которых были заложены частицы необходимого состава. Особенностью использования технологии сварки для модифицирования состава расплавленного металла, является необходимость защиты вводимых порошков от прямого воздействия сварочной дуги для предотвращения их полного расплавления или испарения. В связи с этим использовалась технология введения порошковых сварочных проволок в относительно «холодную» часть сварочной ванны с температурой ванны порядка 1600...1800°C, которая была ниже температур плавления большинства соединений.

С целью изучения влияния нанодисперсных частиц на формирование структуры и механические свойства металла сварных швов были выполнены стыковые сварные соединения листов стали 14ХГНДЦ толщиной 20 мм на постоянном токе обратной полярности. Сварка выполнялась под слоем активирующего керамического флюса, шлаковую основу которого составляла система Al₂O₃–MgO–SiO₂–CaF₂, с использованием порошковой проволоки Св-09Г, наполненную тугоплавкими соединениями нано- и микрочастиц: TiC, TiN, SiC, VC, NbC, TiO₂, Al₂O₃, MgO, ZrO₂.

Используемые порошки были получены различными методами (механическим дроблением, восстановительным и СВС-синтезом), что позволило сформировать частицы соответствующего состава, размера, однородности распределения. Общий вид порошковых частиц инокуляторов приведен на рис.1.

Характер структурных превращений в металле швов легированных наночастицами изучали методом имитации термодинамического цикла сварки (ТДЦ) с использованием комплекса Gleeble 3800 (DSI, США) оснащенный быстродействующим dilatометром [6]. В соответствии с разработанной в ИЭС им. Е.О. Патона методикой, по заданной программе образцы нагревались в вакуумной камере до температуры 1170°C, а затем охлаждались по термическим циклам характерным для автоматической дуговой сварки под флюсом со скоростями 5; 10; 17; 30; 45°C/с на участке температур 800...500°C. При изучении кинетики распада аустенита температуры начала, окончания

превращения и количество продуктов превращения определяли по известной методике [7].

Микроструктура металла исследованных швов с частицами инокуляторами карбидного, нитридного и оксидного типа представлена на рис.2.

Анализ полученной структуры металла швов показал, что применение модификаторов, содержащих карбиды VC, NbC, SiC приводит к формированию преимущественно структур верхнего бейнита рис.2а от 40% до 70%, что значительно понижает величину ударной вязкости сварных швов при отрицательных температурах (табл.1).

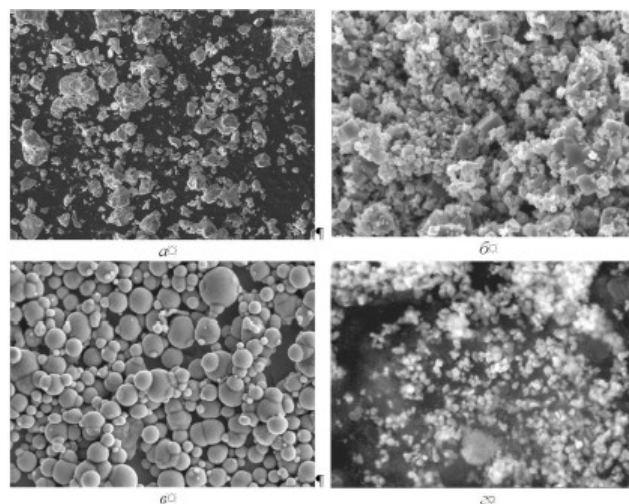


Рис.1 Общий вид исходных порошковых наноматериалов: а) TiC; б) TiN; в) TiO₂; г) ZrO₂. ×30000./ Fig. 1. General view of the source of powder nanomaterials: a) TiC; b) TiN; в) TiO₂; г) ZrO₂. ×30000.

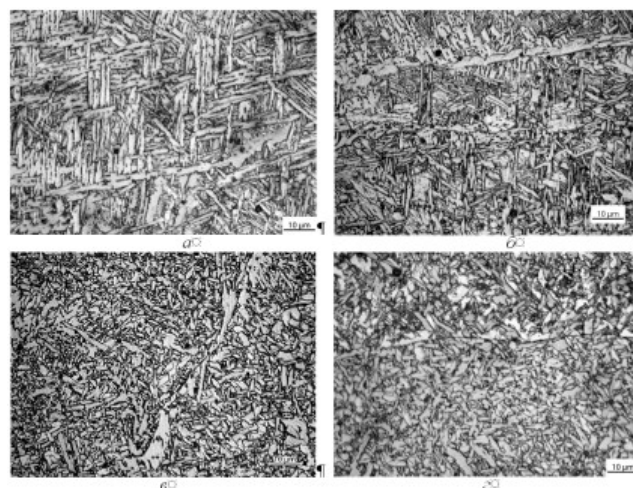


Рис.2 Микроструктура металла исследованных швов с модификаторами карбидного типа: а) TiC; б) NbC; в) TiO₂; г) ZrO₂. x500/ Fig. 2. Microstructure of the investigated metal seams with modifiers carbide types: a) TiC; б) NbC; в) TiO₂; г) ZrO₂. x500

Таблица 1.

Механические свойства металла исследованных швов / The mechanical properties of the metal joints investigated

Тип нано-частиц	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	KCV, Дж/см ² при T, °C			
	МПа		%		+ 20	0	- 20	- 40
—	693	605	14,5	48,4	97	87	75	53
TiC	716	644	19	63	—	—	85	73
TiN	712	580	5,3	14,7	55	47	40	—
SiC	726	650	21	62	85	72	65	61
VC	780	706	14	56	57	55	52	—
NbC	544	594	3,0	5,75	44	35	24	—
TiO ₂	708,7	636,4	19,3	56,7	84,6	71,7	60,0	50,0
Al ₂ O ₃	728,2	621,4	17,5	54,4	82,1	58,3	50,4	35,8
MgO	644,5	586	18,6	59,9	102,9	—	69,2	60,0
ZrO ₂	621,6	532,2	19,5	65	119,6	—	72,9	64,6

Результаты

Применение наночастиц нитридов титана TiN, приводит к повышению доли внутризеренного и полигонального феррита рис.2б (до 50%), что так же крайне неблагоприятно сказывается на величине ударной вязкости металла швов уже при относительно высокой температуре испытаний KCV₋₂₀ 40 Дж/см².

Использование наночастиц оксидов TiO₂, ZrO₂, MgO рис. 2в, г способствует формированию дисперсной структуры игольчатого феррита (от 30 до 90%), который, как известно, позволяет получить в металле сварных швов более благоприятное сочетание высокой прочности и ударной вязкости, особенно при крайне низких температурах испытаний (-40...-60°C).

С целью объяснить благоприятное влияние наночастиц оксидов TiO₂, ZrO₂, MgO на структуру и механические свойства металла исследованных швов по сравнению с влиянием карбидных и нитридных наночастиц была изучена кинетика превращения аустенита и построены термокинетические диаграммы распада аустенита металла исследованных швов (рис.3).

Анализ полученных результатов показал, что распад аустенита в металле швов модифицированных оксидными наночастицами TiO₂, ZrO₂, Al₂O₃, MgO происходит при температурах значительно выше (на 100...150°C), чем при модифицировании карбидными или нитридными наночастицами.

При модифицировании металла швов частицами нанооксидов начало бейнитного превращения начинается при температурах 670...700°C при низких скоростях охлаждения 5°C/с, которые соответствуют режиму дуговой сварки, и при температурах 630...670°C при высоких скоростях охлаждения 45°C/с, которые соответствуют режимам лазерной или гибридной сварки.

При модифицировании металла швов наночастицами карбидов и нитридов превращение аустенита в швах начинается при значительно меньших температурах (при скорости охлаждения 5°C/с - 550...600°C и при скорости охлаждения 45°C/с - 470...550°C соответственно).

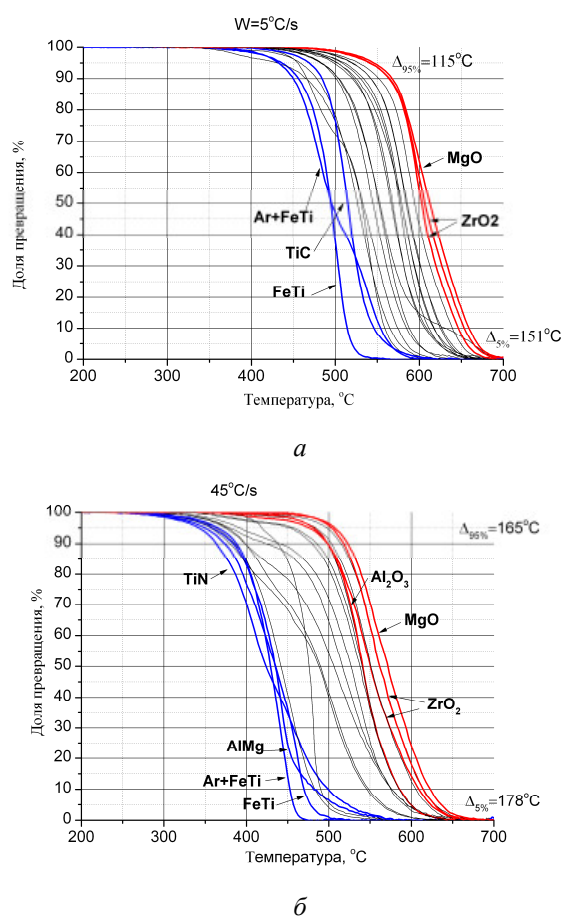


Рис.3. Кинетические диаграммы распада аустенита металла швов с различным типом инокуляторов при скоростях охлаждения: а) 5°C/с; б) 45°C/с. (диапазон изменения температур: $\Delta_{5\%}$ - начала превращения, $\Delta_{95\%}$ - окончания превращения).

Температуры окончания бейнитного превращения и начала мартенстного практически практически не зависят от типа вводимых наноразмерных частиц и составляют порядка 420...450 °C.

Таким образом, полученные результаты показали, что в металле сварных швов высокопрочных низколегированных сталей распад аустенита

происходит в высокотемпературной области бейнитного превращения. Но в отличие от структур металла шва, полученных традиционными методами легирования, при которых в швах формируется структура полигонального, Видманштеттового феррита и верхнего бейнита, при модифицировании оксидными наночастицами в металле швов формируется структура игольчатого феррита.

Такое влияние наночастиц объясняется тем, что наноксиды в металле швов ВПНЛ сталей служат своеобразными дополнительными центрами кристаллизации при формировании структуры игольчатого феррита.

Повышенная стойкость переохлажденного аустенита к превращению при модифицировании металла швов наночастицами карбидов и нитридов возможно связана с различием в величине поверхностной энергии на границе фаза-частица (γ -фаза/карбид и γ -фаза/оксид). Большая величина поверхностной энергии на границе γ -фаза/наноксид будет способствовать более раннему началу развития превращения.

Другой вероятной причиной объяснения повышенной стойкости аустенита, являются величины микронапряжений, которые возникают на границе γ -фаза/наночастица. При низких температурах образование ферритной фазы вокруг наночастиц диффузионным путем значительно затруднено. Понижение температуры превращения будет создавать дополнительные микронапряжения вокруг наночастиц, что будет способствовать развитию $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения по сдвиговой кинетике. Повидимому, микронапряжения формирующиеся вокруг наноксидов округлой формы значительно выше, чем вокруг наночастиц VC, NbC, SiC правильной геометрической формы, что и определяет характер превращения.

С целью подтвердить сделанные предположения были получены микродифракционные картины с участков на границе включение/ наночастица рис.4. Исследования показали, что угол разориентации на границе частицы/феррит составляет порядка 15° – для оксидных частиц, и порядка $5...10^\circ$ – для частиц нанокарбидов.

Этот результат хорошо согласуется с данными представленными в работе [8], что различие в размерах кристаллической решетки частиц модификаторов с решеткой кристаллизующейся фазы не должно отличаться более чем на $10...15\%$

Эффективность частиц модификаторов оказывается тем выше, чем меньше их растворимость, выше термодинамическая устойчивость и больше разница между температурами плавления частиц и металлического расплава [9]. Наночастицы изменяют кинетику превращения аустенита, способствуя образованию соответствующего типа структуры металла шва (феррита, бейнита, мартенсита), совокупность которых обеспечивает требуемый уровень механических свойств.

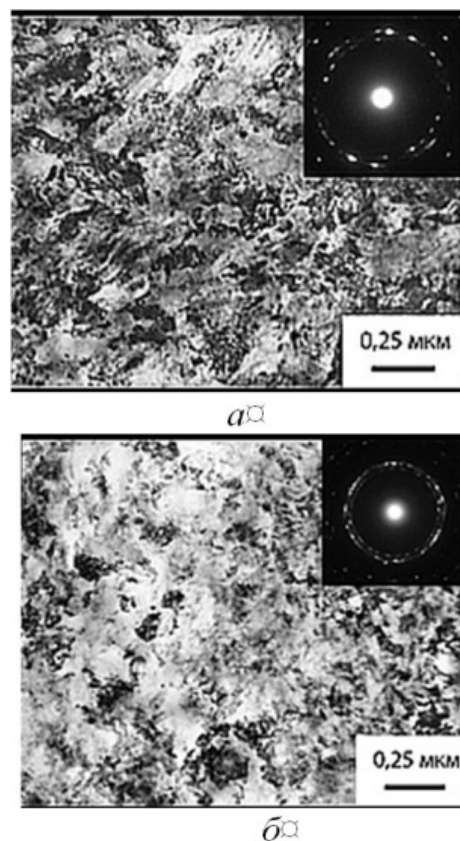


Рис.4 Электронная дифракция металла швов с различным типом инокуляторов: а) TiC, б) TiO₂ x30000/ Fig. 4. Electron diffraction metal joints with different types inoculators: a) TiC, b) TiO₂ x30000 .

Научная новизна и практическая значимость

Модифицирование металла швов наночастицами оксидов титана TiO₂ и циркония ZrO₂ приводит к развитию превращения в высокотемпературной области образования бейнита с образованием игольчатого феррита, который обладает благоприятным комплексом прочностных, пластических и вязких свойств. Карбиды TiC, SiC и нитриды TiN, NbN снижая температуру начала образования бейнита приводят к образованию бейнитно-мартенситных структур (нижнему бейниту, микрофазам, МАК-фазе), которые обладают пониженными вязкими и пластическими свойствами. Соединения VN, VC и ZrC хорошо растворимы в жидком металле сварочной ванны и, вследствие этого, они малопригодны в качестве эффективных модификаторов структуры металла швов. Результаты работы будут использованы для повышения эксплуатационных свойств сварных соединений ВПНЛ сталей.

Выводы

1. Установлено, что введение в сварочную ванну нанопорошковых частиц, является эффективным способом воздействия на структуру и свойства

металла швов высокопрочных низколегированных сталей.

2. Показано, что карбиды и нитриды тугоплавких металлов снижая температуру начала превращения приводят к образованию комплекса бейнитно-мартенситных структур, которые обладают пониженными вязкими и пластическими характеристиками.

3. Использование частиц оксидов титана и циркония позволяет обеспечить высокие значения предела прочности (708 МПа и 621 МПа) и ударной вязкости KCV₋₂₀ (60 Дж/см² и 72,9 Дж/см²), за счет формирования бейнитных (модифицирование TiO₂) или игольчатых (модифицирование ZrO₂) структур. Стрелки частиц инокуляторов оксиды TiO₂ или ZrO₂.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Плазмохимический синтез ультрадисперсных порошков и их применение для модифицирования металлов и сплавов / Сабуров В.П., Черепанов А.Н. и др. – Новосибирск: Изд-во Наука, 1995, – 344 с. – Режим доступа:
2. Костин В.А. Влияние нановключений на формирование структуры металла швов феррито-бейнитных сталей (обзор) / В.А. Костин В.В. Головкин, Г.М. Григоренко // Збірник наукових праць НУК ім. Макарова – 2011. – №4 (433), електронне видання. Режим доступу: <http://jnn.nuos.edu.ua/article/download/25589/23055>
3. Модифицирование сталей и сплавов дисперсными инокуляторами / Сабуров В.П., Еремін Е.Н., Черепанов А.Н., Миннеханов Г.Н. – Омск.: Изд-во ОмГТУ, 2002, – с.257.
4. Походня И.К. Технология модифицирования и рафинирования чугуна с применением порошковой проволоки / Походня И.К., Альтер В.Ф., Шумихин В.С., Раздобарин И.Г. // Процессы литья. – 1993. – №1. – С.3-8; ил.- Библиогр.: С.8.
5. Григоренко Г.М. Влияние нанопорошковых инокуляторов на структуру и свойства литого металла высокопрочных низколегированных сталей / Григоренко Г.М., Костин В. А., Головкин В. В., Жуков В. В., Зубер Т.А. // Современная электрометаллургия, – 2015.- №2. – С.32-41.
6. Григоренко Г.М. Современные возможности моделирования превращений аустенита в сварных швах низколегированных сталей / Григоренко Г.М., Костин В.А., Орловский В.Ю. // Автоматическая сварка. – 2008. – №3. – С.31-34. Режим доступу: <http://patonpublishinghouse.com/as/pdf/2008/as200803all.pdf>
7. Экспериментальная техника в физическом материаловедении. / Черепин В.Т. - К.: Техніка, 1968. – 280с.
8. Теоретические основы кристаллизации металлов и сплавов / Задиранов А.Н., Кац А.М.: учеб. пособие, Москва. : МГИУ, 2008. – 194 с.
9. Калинин В.Т. О критериальной оценке эффективности модификаторов при обработке чугунов / Калинин В.Т., Хрычков В.Е., Кривошеев В.А. // Теория и практика металлургии. – 2004. – № 2. – С. 25–29.

REFERENCES

1. Saburov V. P, Cherepanov A. N. *Plazmo-chimicheskiy sintez ultradispersnykh poroshkov i ich primeneniye dlya modifitsirovaniy metallov i splavov* [Plasma-chemical synthesis of ultrafine powders and their application for the modification of metals and alloys]. Novosibirsk: Nauka, 1995, 344 p. (in Russian).
2. Kostin V.A. *Vliyanie nanovklucheniy na formirovaniye struktury metalla shvov ferrito-beybitnykh staley (obzor)* [Nano-inclusions influence on the structure of weld metal ferrite-bainite steels (Review)]. *Zbirnik naukovykh prac natsionalnoho universytetu korablebuduvanniy imeni Makarova* [Collection of scientific papers of National Shipbuilding University named after Makarova], 2011, Issue 4(433). (in Russian). <http://jnn.nuos.edu.ua/article/download/25589/23055>
3. Saburov V.P, Eremin E.N, Cherepanov A.N, Minnehanov G.N *Modifitsirovaniye staley i splavov dispersnyimi inokulyatorami* [Modification of steels and alloys dispersed inoculators], Omsk: OmGTU, 2002, 257 p. (in Russian).
4. Pokhodnya I.K., Al'ter V.F., Shumikhin V.S., Razdobarin I.G. *Tekhnologiya modifitsirovaniya i rafinirovaniya chuguna s primeneniym poroshkovoy provoloki* [The technology of modifying and refining iron cored wire using]. *Protsessy lit'ya - [Casting Processes]*. 1993, no.1, pp.3-8. (in Russian).
5. Grigorenko G.M., Kostin V. A., Golovko V. V., Zhukov V. V., Zuber T.A. *Vliyaniye nanoporoshkov inokulyatorov na strukturu i svoystva litogo metalla vysokoprochnykh nizkolegirovannykh staley* [Influence of nanopowders inoculators on the structure and properties of cast metal high-strength low-alloy steels]. *Sovremennaya elektrometallurgiya*, - [Modern electrometallurgy]. 2015, no.2, pp.32-41. (in Russian).
6. Grigorenko G.M., Kostin V.A., Orlovskiy V.YU. *Sovremennyye vozmozhnosti modelirovaniya prevrashcheniy austenita v svarnykh shvakh nizkolegirovannykh staley* [Modern modeling capabilities austenite transformations in welds low-alloy steels]. *Avtomaticheskaya svarka*.- [Automatic welding]. 2008, no.3, pp.31-34. (in Russian).
7. Cherepin V.T. *Ekspperimental'naya tekhnika v fizicheskoy metallovedenii* - [Experimental technique in physical metallurgy.]/ - K.: Tekhnika, 1968, 280p. (in Russian).
8. Zadiranov A.N., Kats A.M *Teoreticheskiye osnovy kristallizatsii metallov i splavov* [Theoretical foundations of crystallization of metals and alloys /Ucheb. posobiye, Moskva. : MGIU, 2008, 194 p. (in Russian).
9. Kalinin V.T., Khrychikov V.Ye., Krivosheyev V.A. *O kriterial'noy otsenke effektivnosti modifikatorov pri obrabotke chugunov* [On the criterion evaluating the effectiveness of the modifier in the processing of iron]. *Teoriya i praktika metallurgii* - [Theory and practice of metallurgy.] 2004, no. 2, pp. 25–29. (in Russian).

Стаття рекомендована до публікації д-ром. техн. наук, проф. В. Н. Сидорцом (Україна); д-ром.техн.наук. Т.М.Лабур. (Україна).