

ИЗНОСОСТОЙКАЯ НАПЛАВКА С ВВОДОМ В СВАРОЧНУЮ ВАННУ НАНОПОРОШКОВ

В.Д. КУЗНЕЦОВ, Д.В. СТЕПАНОВ

НТУУ «Киевский политехнический институт». 03056, г. Киев-56, пр-т Победы, 37. E-mail: v.kuznetsov@kpi.ua

На пути поиска новых способов достижения высокой износостойкости наплавленного металла применительно к изделиям, работающим в условиях трения, представляют интерес экспериментальные исследования износостойкости наплавленного металла, полученного с введением в сварочную ванну наноксидов. В работе приведены результаты испытаний на износ наплавленного металла типа 40Х13, 25ХГ2С, 300Х28М, модифицированного наноксидами алюминия, титана и кремния через сварочную ванну по различным схемам ввода. Показано, что введение в сварочную ванну наноксидов приводит к заметному повышению износостойкости наплавленного металла. Библиогр. 11, рис.8.

Ключевые слова: дуговая наплавка, износостойкость, наноксиды, неметаллические включения, структура

Свойства наплавленного металла определяются заданным составом легирующих элементов и структурой. В зависимости от условий работы устанавливаются требования к составу и структуре металла для обеспечения необходимых показателей его износостойкости. Основные результаты исследований в этом направлении обобщены в работах [1, 2].

В последние годы в публикациях отмечается существенная роль неметаллических включений как фактора управления структурой и свойствами литого металла. Основная часть исследований выполнена применительно к сварке низколегированных сталей. При этом образование таких включений в виде оксидов, карбидов, нитридов в металле швов рассматривалось как следствие химических соединений соответствующих элементов в процессе кристаллизации, а самим включениям как размерного диапазона до 1 мкм, так и близкого к наноразмерному, отводилась роль инокуляторов [1–6]. В других случаях образование неметаллических включений являлось следствием ввода в сварочную ванну наноксидов или нанокарбидов [7–9]. Во всех случаях отмечается положительная роль включений определенного состава, размеров и плотности распределения на структуру и свойства сварных швов.

Сведения о их влиянии на износостойкость наплавленного металла ограничены, хотя имеющийся опыт использования как наноксидов при плазменной наплавке [10], так и нанокарбидов в покрытии электродов [11] указывает на перспективность их применения в наплавочных процессах.

Цель работы — экспериментальное исследование износостойкости наплавленного металла при вводе в сварочную ванну наноксидов.

В опытах использовали различные схемы ввода наноксидов в сварочную ванну. Наноконпоненты вводили в сварочную ванну в виде лигатуры после прессования и спекания гомогенной смеси порошков железа фракцией 40 мкм и наноразмерных порошков оксидов алюминия, титана (27...41 нм) с заданным объемным соотношением.

Приготовленная лигатура использовалась как расходный электрод определенной длины и диаметра, заложенный в паз перед наплавкой. В этих опытах использовали объемные соотношения наноксидов, установленные ранее применительно к сварке низколегированных сталей [8, 9].

По другим, более технологичным для наплавки схемам, приготовленные в заданных объемных соотношениях смеси после их обработки в планетарной мельнице во избежание рассеивания предварительно закрепляли грунтовкой и наносили тонким слоем по ширине валика на длину наплавки. По такой же схеме осуществляли ввод в сварочную ванну только порошков наноксидов с пересчетом их массовой доли к объему сварочной ванны.

Для условий трения металла по металлу триботехнические испытания проводили на машине трения типа СМЦ-2 по схеме вал–колодка. Использовали образцы длиной 20 мм и шириной 10 мм. В качестве контртела использовали диск Ø 50 мм из стали У8 твердостью НВ 400...450. Условия испытаний: давление на образец $P = 0,1$ МПа; скорость трения $v = 0,8$ м/с; температура испытаний $T = 20$ °С; продолжительность испытаний 2,5 ч с измерениями через каждые 30 мин.

Образцы взвешивали до и после испытаний на точных лабораторных весах с погрешностью 0,001 г. Массовый износ определяли как разницу значений массы образца до и после испытаний.

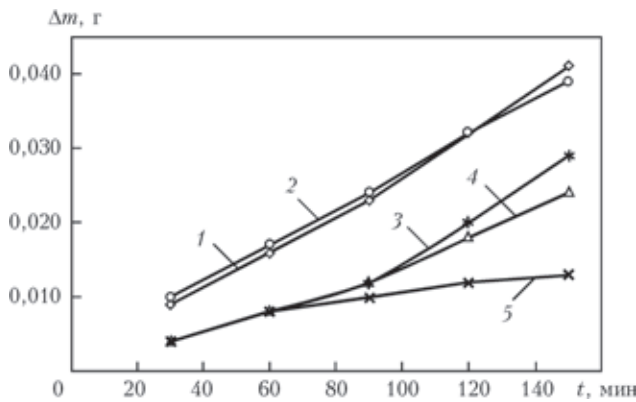


Рис. 1. Износостойкость наплавленного металла проволокой ПП-Нп-40Х13 с вводом нанодобавок через спеченную лигатуру: 1 — исходный валик; 2 — с вводом в ванну 0,5 % TiO₂; 3 — 1 % TiO₂; 4 — 1 % Al₂O₃; 5 — 0,5 % Al₂O₃

Испытания на абразивный износ проводили на установке ЛКИ-3 путем измерения потерь массы через каждые 30 м пути трения. В качестве абразива использовали электрокорунд марки 14А зернистостью 0,4...1,0 мм. Образцы испытывали при постоянной нагрузке $P = 150$ Н на протяжении общего пути трения 480 м. После каждых 30 м образцы поворачивали на 90° для равномерного износа и после каждых 120 м взвешивали на весах для определения изменения массы.

С целью выявления общих закономерностей наплавки проводили, используя различные процессы и условия. Так, эксперименты по наплавке с использованием рекомендуемых для условий трения металла по металлу порошковой проволоки ПП-Нп-40Х13 диаметром 2 мм проводили на сталь Ст3 как в смеси газов 72 % Ar + 28 % CO₂ полуавтоматом КП 004У3 на погонной энергии 10,6 кДж/см, так и открытой дугой автоматом АД-231 при погонной энергии 15 кДж/см, а наплавку проволокой 25ХГ2С диаметром 2,2 мм на сталь 09Г2С автоматом АД-231 на погонной энергии 11,5 кДж/см.

Для условий абразивного износа использовали порошковую проволоку ПП-АН-180 (аналог порошковой ленты ПЛ-АН-180) диаметром 2,7 мм,

наплавку которой также проводили на сталь Ст3 автоматом АД-231 на погонной энергии 12 кДж/см.

Испытания наплавленного металла при сварке в смеси газов проволокой ПП-Нп-40Х13 показали (рис. 1), что при вводе в сварочную ванну наноксидов при плавлении спеченной лигатуры его износостойкость повышается как при наличии наноксидов алюминия, так и титана. При этом потери в массе в случае использования наноксида Al₂O₃ меньше по сравнению с TiO₂ (сравнить кривые 4, 5 и 2, 3). Максимальный эффект наблюдается при вводе в ванну 0,5 % Al₂O₃, при этом потери в массе снижаются с $\Delta m = 0,042$ г (исходный валик, кривая 1) до $\Delta m = 0,013$ г (0,5 % Al₂O₃, кривая 5), т.е. более чем в 3 раза. Этими данными было подтверждено, что при наплавке как и при сварке введенные объемные соотношения наноксидов оказывают влияние на свойства литого металла.

Измерения микротвердости показали, что при среднем значении микротвердости исходного металла валика HV 530 в остальных случаях микротвердость уменьшалась (0,5 % TiO₂ — HV 478, 1 % TiO₂ — HV 460, 0,5 % Al₂O₃ — HV 469) за исключением 1 % Al₂O₃ — HV 552.

Микроструктура наплавленного металла представляет собой мартенсит с характерным для исходных условий развитым крупноигльчатым строением (рис. 2, а). В случае наплавки с наноксидом 0,5 % Al₂O₃ наблюдается заметно меньшая блочность мартенситных выделений с менее развитым игльчатым строением (рис. 2, б). Характерной особенностью является также наличие по границам зерен, возможно, карбидов и оксидов, которые как твердая составляющая, наряду с утонением мартенситных выделений, способствуют повышению износостойкости такого металла. Корреляции между твердостью и износостойкостью в этом случае не наблюдается.

При использовании схемы наплавки с закреплением порошков на поверхности пластины дополнительно вводили аэросил (диоксид кремния) как в смеси с порошком железа, так и в чистом виде. Аэросил выпускается в промышленных мас-

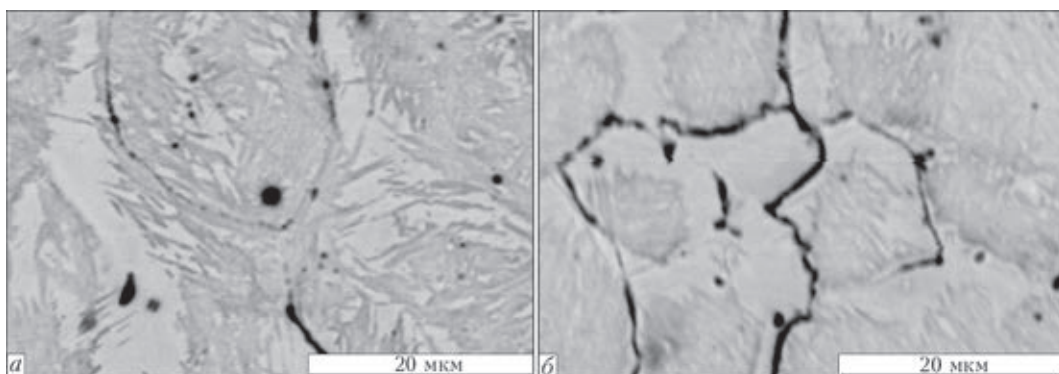


Рис. 2. Микроструктура наплавленного металла при вводе наноксидов через лигатуру: а — исходный валик; б — с наноксидом 0,5 % Al₂O₃

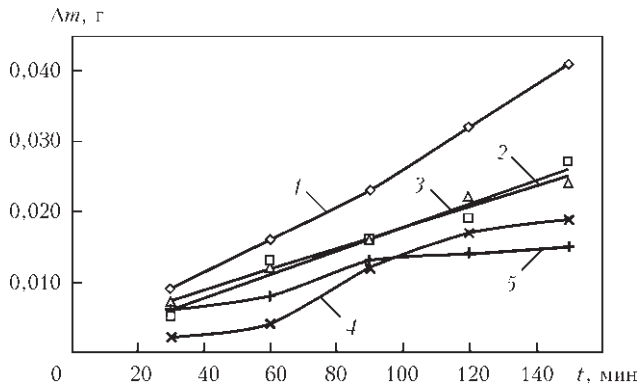


Рис. 3. Износостойкость металла, наплавленного проволокой ПП-Нп-40Х13 с вводом нанодобавок через порошковые материалы: 1 — исходный валик; 2 — Fe + 0,5 % Al₂O₃; 3 — Fe + 0,5 % TiO₂; 4 — Fe + 45 % SiO₂; 5 — 10 % SiO₂

штабах для приготовления различных смазок, красок и лаков, для стабилизации суспензий. Учитывая в несколько раз меньшую плотность аэросила по отношению к наноксидам алюминия и титана его объемные соотношения соответственно были увеличены.

Установлено, что наноксиды алюминия и титана в этом случае показали меньшую износостойкость (рис. 3, сравнить кривые 2, 3 и кривую 1 исходного валика) по сравнению с вводом через спеченную лигатуру (рис. 1), что, по видимому, связано с отклонениями от процентного соотношения и их неполным усвоением сварочной ванной. Максимальная износостойкость наблюдается в случае использования порошка только наноксида кремния. В этом случае потери по массе снижаются с $\Delta m = 0,042$ г (рис. 3, кривая 1) до $\Delta m = 0,015$ г (рис. 3, кривая 5), т.е. в 2,8 раза.

Испытания металла, наплавленного открытой дугой проволокой 25ХГ2С показали (рис. 4), что как оксид алюминия, так и титана способствуют повышению износостойкости наплавленного металла (сравнить кривые 2, 3 и кривую 1 исходного валика), а потери в массе в случае ввода 0,7 % Al₂O₃ снижаются в 4 раза. Максимальная износостойкость более чем в 6 раз наблюдается в случае использования диоксида кремния (рис. 4, сравнить кривые 4 и 1).

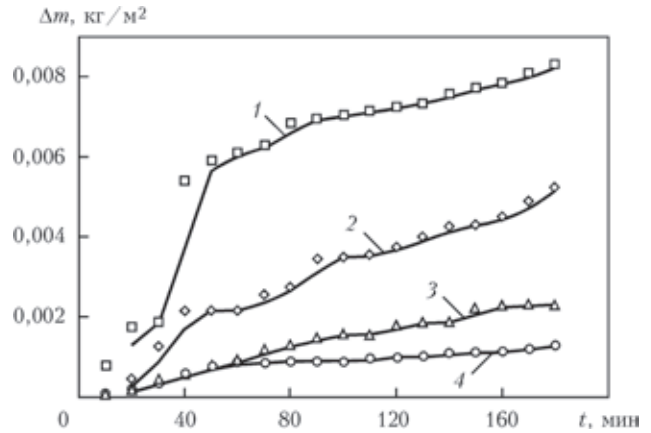


Рис. 4. Износостойкость металла, наплавленного проволокой 25ХГ2С: 1 — исходный валик; 2 — 0,5 % TiO₂; 3 — 0,7 % Al₂O₃; 4 — 90 % SiO₂

Измерения микротвердости показали, что при среднем значении исходного металла валика $HV\ 352$ в остальных случаях микротвердость уменьшалась (0,5 % TiO₂ — $HV\ 271$, 0,7 % Al₂O₃ — $HV\ 313$) за исключением 90 % SiO₂ — $HV\ 424$.

В данном случае наблюдается корреляция между твердостью и износостойкостью наплавленного металла. Анализ показал, что металл исходного валика имеет бейнитную структуру с незначительным количеством мартенситной составляющей (рис. 5, а). Для наплавленного металла с диоксидом кремния характерна чисто мартенситная структура (рис. 5, б), что, по видимому, и определяет повышение износостойкости.

По результатам анализа распределения количества неметаллических включений было установлено, что в исходном состоянии без нанодобавок их объемная доля составляет 0,25 % и приходится, в основном, на размерный диапазон 0,07...0,49 мкм, из которых от 12 до 16 % включений соответствуют размерному диапазону 0,13...0,37 мкм.

В металле валика с наноксидом 0,5 % TiO₂ объемная доля неметаллических включений несколько больше и составляет 0,27 % , из которых от 6 до 12 % включений соответствуют размерному диапазону 0,07...0,55 мкм.

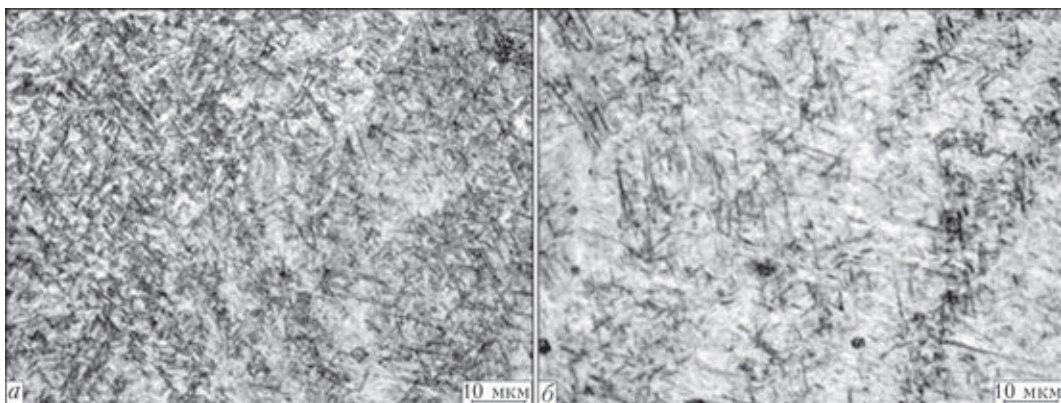


Рис. 5. Микроструктура наплавленного металла без (а) и с добавками SiO₂ (б)

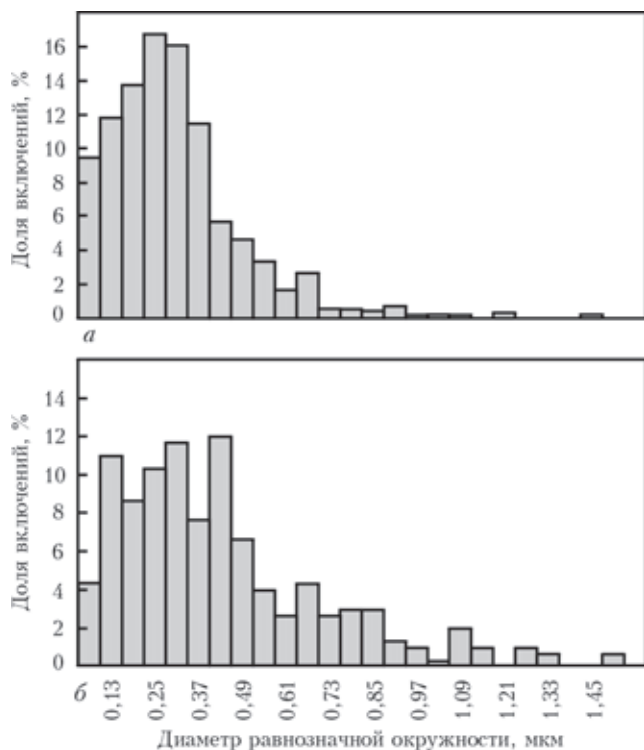


Рис. 6. Гистограмма распределения включений в наплавленном металле по показателю диаметра равнозначной окружности: *a* — в исходном состоянии; *б* — с наноксидом SiO₂ в количестве 90 об. %

В металле валика с наноксидом 0,7 % Al₂O₃ объемная доля неметаллических включений также больше и составляет 0,34 %, из которых от 6 до 15 % включений соответствуют размерному диапазону 0,07...0,55 мкм.

В металле валика с наноксидом 90 % SiO₂ объемная доля неметаллических включений меньше и составляет 0,2 %, из которых от 4 до 12% включений соответствуют размерному диапазону 0,07...0,85 мкм.

Сравнительный анализ данных указывает на увеличение объемной доли включений в размерном диапазоне 0,07...0,55 мкм при введении наноксидов как алюминия, так и титана и соответственно в большем размерном диапазоне 0,07...0,85 мкм при введении аэросила в сравнении с исходной структурой.

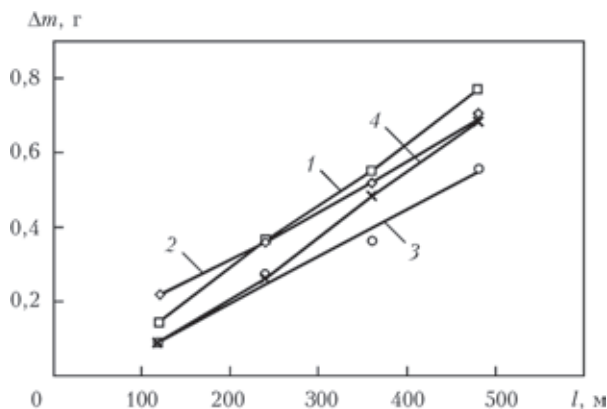


Рис. 7. Износостойкость наплавленного металла проволокой ПП-АН-180 с вводом нанодобавок через порошковые материалы: 1 — исходный валик; 2 — Fe + 0,5 % Al₂O₃; 3 — Fe + 5 % Al₂O₃; 4 — Fe + 0,5 % Al₂O₃

Выявленные закономерности подтверждаются также результатами обработки размеров включений только сферической формы по показателю диаметра равнозначной окружности. Для примера, на рис. 6 приведены гистограммы по объемному содержанию и распределению таких включений в металле шва для исходного состояния и с наличием наноксида кремния.

Обработка размеров включений только сферической формы по показателю диаметра равнозначной окружности показала, что в исходном состоянии без добавления порошка наноксида основная часть сферических включений от 9 до 16 % приходится как на диапазон размеров до 0,3 мкм, так и на диапазоны 0,3...0,5 мкм (рис. 6, *a*).

При добавлении порошка наноксида 90 % SiO₂ часть сферических включений как размером до 0,3 мкм, так и в диапазоне 0,3...0,5 мкм возрастает до 12 %. При этом наблюдается наличие включений с размерами больше 0,8 мкм (рис. 6, *б*). Факт укрупнения неметаллических включений в этом случае может быть связан с повышенной концентрацией наночастиц аэросила, способствующей их коагуляции и коалесценции с неметаллическими включениями материала во время кристаллизации сварочной ванны.

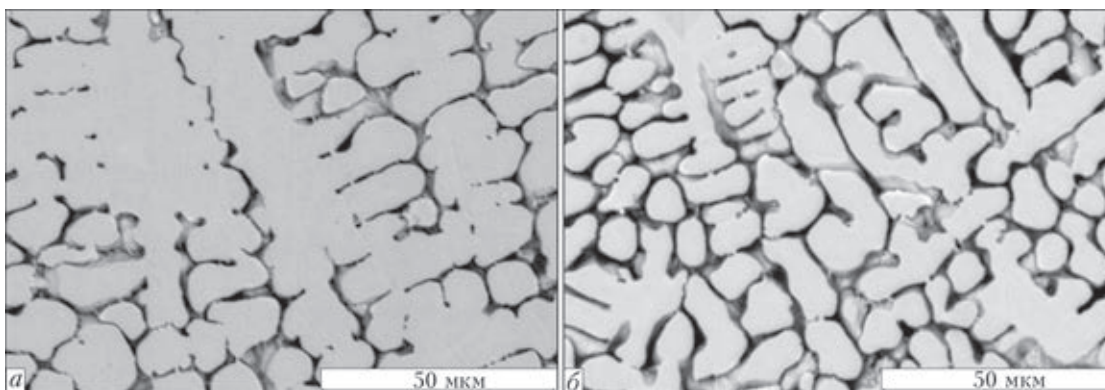


Рис. 8. Микроструктура наплавленного металла без (*a*) и с добавками Al₂O₃ (*б*)

Испытания композиции высокохромистого чугуна при наплавке порошковой проволокой ППА-АН-180 показали, что при объемном содержании 0,5 % введение наноксидов титана и алюминия практически одинаково влияют на износостойкость с незначительным ее увеличением (рис. 7, кривые 1, 4, 2). В этих опытах повышение износостойкости в 1,4 раза наблюдалось при введении 5 % Al_2O_3 .

Анализ показал, что в исходном валике структура заэвтектического чугуна характеризуется достаточно крупными цементитными выделениями в аустенитной матрице (рис. 8, а). В случае использования 5 % Al_2O_3 наблюдается существенная дисперсность цементитных выделений, что, по видимому, и определяет повышение износостойкости такой структуры.

Таким образом, исследования показали, что независимо от используемых систем легирования наплавочных материалов и условий наплавки общим является положительное влияние наноксидов на износостойкость наплавленного металла. На данном этапе исследований не представляется возможным делать однозначные выводы относительно как механизма проявления положительного эффекта от использования наноксидов, так и их объемного содержания для различных условий наплавки, что требует дополнительных исследований.

Выводы

1. При наплавке высокохромистых композиций с повышенным содержанием углерода подтверждено положительное влияние на износостойкость объемных соотношений наноксидов алюминия и титана, установленное ранее для сварных швов низколегированных сталей. Установлено, что применительно к этим композициям более эффективной нанодобавкой является диоксид кремния.

2. При наплавке среднелегированных композиций также установлено, что диоксид кремния более эффективен по отношению к наноксидам алюминия и титана, обеспечивая повышение износостойкости более чем в 4 раза.

3. Для условий абразивного износа при наплавке композиции высокохромистого чугуна эффект повышения износостойкости проявляется в меньшей степени (на 40 %) по сравнению с композициями, рекомендованными для условий трения металла по металлу.

1. *Рябцев И.А.* Наплавка деталей машин и механизмов. – К.: Екотехнологія, 2004. – 160 с.
2. *Рябцев И.А., Сенченко И.К.* Теория и практика наплавочных работ. – К.: Екотехнологія, 2013. – 400 с.
3. *Effect of Inclusion Size on the Nucleation of Acicular Ferrite in Welds* / T.K. Lee, H.J. Kim, B.Y. Kang, S.K. Hwang // *ISIJ Int.* 2000. – **40**. – P. 1260–1268.
4. *Головко В.В., Григоренко Г.М., Костин В.А.* Влияние нановключений на формирование структуры металла швов ферритно-бейнитных сталей (Обзор) // *Зб. наук. пр. НУК.* – 2011. – № 4. – С. 42–49.
5. *Головко В.В., Степанюк С.М., Ермоленко Д.Ю.* Дослідження впливу нанотворень в металі на формування мікроструктури зварного шва та його механічні властивості // *Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. тр.* – 2012. – Вып. 64. – С. 155–159.
6. *Головко В.В., Походня И.К.* Влияние неметаллических включений на формирование структуры металла сварных швов высокопрочных низколегированных сталей // *Автомат. сварка.* – 2013. – № 6. – С. 3–11.
7. *Influence of aluminum content on the characterization of microstructure and inclusions in high-strength steel welds* / W. Vanovsek, C. Bernhard, M. Fiedler, G. Posch. // *Welding in the World.* – 2013. – Vol 57, № 1. – P. 73–83.
8. *JunSeok SEO, HeeJin KIM, Changhee LEE.* Effect of Ti Addition on Weld Microstructure and Inclusion Characteristics of Bainitic GMA // *Welds, ISIJ International.* – 2013. – Vol. 53, № 5. – P. 880–886.
9. *Влияние нанофольги системы Ni-NbC на структуру швов жаропрочных сталей, выполненных электронно-лучевой сваркой* / К.А. Ющенко, А.И. Устинов, Б.А. Задерий и др. // *Автомат. сварка.* – 2011. – № 8. – С. 5–11.
10. *Вплив модифікування наночастинками оксидів на структуроутворення зварних швів низьколегованих сталей* / В.Д. Кузнецов, І.В. Смирнов, Д.В. Степанов, К.П. Шаповалов // *Міжвузів. зб. «Наукові нотатки».* – 2013. – № 41. – Ч. 2. – С. 61–68.
11. *Kuzniecowa W., Szapowalowa K.* Effect of Nano-oxides on the Structure and Properties of Low-alloy Steel Weld Metal // *Biuletyn instytutu spawalniczego.* – 2014. – № 5. – P. 103–108.
12. *Повышение свойств плазменно-порошковых покрытий модифицированием наноразмерными частицами* / К.В. Князьков, М.В. Радченко, А.Н. Смирнов и др. // *Ползуновский вестник.* – 2012. – № 1. – С. 127–130.
13. *Модифицирование структуры наплавленного металла нанодисперсными карбидами вольфрама* / Г.Н. Соколов, И.В. Лысак, А.С. Трошков и др. // *Физ. и химия обработанных материалов.* – 2009. – С. 18–25.

Поступила в редакцию 12.05.2015

■ НАПЛАВКА ГРЕБНЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС

Разработанная в ИЭС технология двухдуговой наплавки проволокой Св-08ХМ под флюсом внедрена на предприятиях «Укрзалізниці» при восстановлении гребней железнодорожных колес грузовых вагонов, изготавливаемых из стали марки 2. Применение разработанной технологии позволило повысить качество восстановления наплавкой колес и их износостойкость при эксплуатации на 35 %. Восстановленные колеса имеют повышенную сопротивляемость усталостному и хрупкому разрушениям.

