Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2021. Т. 18. № 4. С. 399–407
Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS)). 2021; 4(18): 399–407

РАЗДЕЛ 1. ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Научная статья
01.04.07 – Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)
УДК 621.791.92
doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2021.04.001

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОМПЛЕКСНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ НА БАЗЕ ПЛАЗМЕННОЙ НАПЛАВКИ В СРЕДЕ АЗОТА

Николай Николаевич Малушин[1†], Виктор Евгеньевич Громов[2], Денис Анатольевич Романов[3], Людмила Петровна Бащенко[4], Андрей Петрович Ковалев[5], Кирилл Валерьевич Соснин[6]

[1, 2, 3, 4, 6] Сибирский государственный индустриальный университет, ул. Кирова, 42, 654007, Новокузнецк, Кемеровская обл. – Кузбасс, Россия
[5] АО «Кузнецкинвестстрой», ул. Орджоникидзе, 35, 654007, Новокузнецк, Кемеровская обл. – Кузбасс, Россия
[1] nmalushin@mail.ru†, http://orcid.org/0000-0003-0762-1793
[2] gromov@physics.sibsiu.ru, http://orcid.org/0000-0002-5147-5343
[3] romanov_da@physics.sibsiu.ru, http://orcid.org/0000-0002-6880-2849
[4] luda.baschenko@gmail.com, http://orcid.org/0000-0003-1878-909X
[5] Akovalev@cc-kisk.ru, https://orcid.org/0000-0002-3837-6324
[6] K.sosnin@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2499-7629

Аннотация. Разработаны физические основы повышения эксплуатационных свойств теплостойких сплавов, сформированных плазменной наплавкой в среде азота, основанные на применении комплекса упрочняющих технологий: плазменная наплавка в защитно-легирующей среде азота; высокотемпературный отпуск; ультразвуковая упрочняющая обработка или азотирование. Установлено, что физическая основа упрочнения теплостойкого наплавленного металла при использовании комплексных технологий обусловлена применением новых способов многослойной плазменной наплавки в среде азота и новых наплавочных материалов, обеспечивающих получение наплавленного металла в состоянии, близком к закаленному состоянию с твердостью поверхности 55–57 HRC и низкой склонностью к образованию холодных трещин. Основой способов является регулируемый термический цикл с низкотемпературным подогревом до температуры 230–250 °С и использование эффекта кинетической пластичности. Дополнительный вклад в упрочнение наплавленного сплава вносит высокотемпературный отпуск при температуре 560–580 °С и ультразвуковая обработка на оптимальная режимах (нормальное усилие на инструмент $P_н$ = 10 Н, амплитуда колебаний A = 20 мкм, скорость обработки V = 20 м/мин), что обеспечивает увеличение твердости до 65–66 HRC. Выявлены физические основы формирования структуры и свойств теплостойкого металла плазменной наплавкой в среде азота. Установлено, что в наплавленном металле основными фазами являются твердый раствор α-Fe, карбиды и карбонитриды на основе железа, вольфрама, хрома, молибдена, алюминия (Fe_6W_6NC и AlN). Промышленные испытания показали, что изготовленные с применением комплексных технологий упрочнения на базе плазменной наплавки активного слоя теплостойкими сталями высокой твердости наплавленные детали обладают повышенной (в 1,5–2,0 раза) стойкостью по сравнению со стойкостью серийных изделий.

Ключевые слова: комплексные технологии упрочнения, плазменная наплавка в среде азота, азотирование, ультразвуковая упрочняющая обработка, теплостойкие сплавы.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – докторов наук МД-486.2020.8 и кандидатов наук МК-5585.2021.4, а также при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-00044.

Для цитирования: Малушин Н.Н., Громов В.Е., Романов Д.А., Бащенко Л.П., Ковалев А.П., Соснин К.В. Физические основы комплексных технологий упрочнения деталей на базе плазменной наплавки в среде азота // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2021. Т. 18, № 4. С. 399–407. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2021.04.001.

Original article

PHYSICAL FOUNDATIONS OF INTEGRATED TECHNOLOGIES FOR STRENGTHENING OF PARTS ON THE BASIS OF PLASMA SURFACE IN A NITROGEN MEDIUM

Nikolai N. Malushin[1†], Viktor E. Gromov[2], Denis A. Romanov[3], Lyudmila P. Bashchenko[4], Andrei P. Kovalev[5], Kirill V. Sosnin[6]

[1, 2, 3, 4, 6] Siberian state industrial University, Kirova street, 42, Novokuznetsk, Kemerovo region – Kuzbass, 654007, Russia
[5] JSC «Kuznetskinveststroy», Ordzhonikidze street, 35, Novokuznetsk, Kemerovo region – Kuzbass, 654007, Russia
[1] nmalushin@mail.ru†, http://orcid.org/0000-0003-0762-1793
[2] gromov@physics.sibsiu.ru, http://orcid.org/0000-0002-5147-5343
[3] romanov_da@physics.sibsiu.ru, http://orcid.org/0000-0002-6880-2849
[4] luda.baschenko@gmail.com, http://orcid.org/0000-0003-1878-909X
[5] Akovalev@cc-kisk.ru, https://orcid.org/0000-0002-3837-6324
[6] K.sosnin@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2499-7629

Abstract. The physical foundations of improving the operational properties of heat-resistant alloys formed by plasma in a nitrogen atmosphere have been developed, based on the use of a set of hardening technologies: plasma surfacing in a protective-alloying nitrogen environment; high temperature tempering; ultrasonic hardening treatment or nitriding. It has been established that the physical basis of hardening of heat-resistant deposited metal when using complex technologies is due to the use of new methods of multilayer plasma surfacing in a nitrogen atmosphere and new surfacing materials, which ensure the production of deposited metal in a state close to the hardened state with a surface hardness of 55–57 HRC and a low tendency to cold cracking. The basis of the methods is a controlled thermal cycle with low-temperature heating to a temperature of 230–250 °C and the use of the effect of kinetic plasticity. An additional contribution to the hardening of the deposited alloy is made by high-temperature tempering at a temperature of 560–580 °C and ultrasonic treatment at optimal modes (normal force on the tool Pn = 10 N, vibration amplitude A = 20 μm, processing speed V = 20 m/min), which provides increase in hardness up to 65-66 HRC. The physical foundations of the formation of the structure and properties of heat-resistant metal by plasma surfacing in a nitrogen atmosphere are revealed. It was found that in the deposited metal the main phases are the α-Fe solid solution, carbides and carbonitrides based on iron, tungsten, chromium, molybdenum, aluminum (Fe6W6NC and AlN). Industrial tests have shown that the weld-on parts made with the use of complex hardening technologies based on plasma surfacing of the active layer with heat-resistant steels of high hardness have increased (1.5–2.0 times) durability compared to the durability of serial products.

Keywords: complex hardening technologies, plasma surfacing in nitrogen, nitriding, ultrasonic hardening treatment, heat-resistant alloys.

Acknowledgements: The research was carried out with the financial support of the Grant of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists – Doctors of Sciences MD-486.2020.8 and Candidates of Sciences MK-5585.2021.4, as well as with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of scientific project No. 20-08-00044.

For citation: Malushin, N. N., Gromov, V. E., Romanov, D. A., Bashchenko, L. P., Kovalev, A. P. & Sosnin, K.V. (2021). Physical foundations of integrated technologies for strengthening of parts on the basis of plasma surface in a nitrogen medium. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 4(18), 399–407. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2021.04.001.

Введение

К поверхностному слою деталей машин горно-металлургического оборудования, работающего в условиях абразивного изнашивания, высоких температур при переменном тепловом режиме (рабочие и опорные валки прокатных станов, валы и ролики дробилок аглофабрик и др.) предъявляются повышенные требования по твердости и износостойкости. Для упрочнения такого оборудования широко применяются различные способы наплавки теплостойкими сталями Р18, Р6М5,Р2М9, 3Х2В8 и др. Эти стали приобретают высокие служебные характеристики (твердость 62 – 64 HRC, теплостойкость до 620 °С) в результате термической обработки (закалки и высокотемпературного отпуска) [1-3]. При наплавке теплостойких сталей образуются холодные трещины, для предотвращения образования которых в традиционной технологии наплавки используется замедленное охлаждение деталей путем применения высокотемпе-

ратурного предварительного и сопутствующего подогрева и помещения наплавленных деталей в теплый короб. В результате наплавленный слой имеет низкую твердость и износостойкость, поскольку проведение полной термической обработки биметалла трудноосуществимо, а для многих деталей невозможно. В итоге свойства высоколегированного теплостойкого металла используются не полностью [3, 4].

В Сибирским государственном индустриальном университете исследованы способы наплавки, основанные на применении эффекта кинетической пластичности и применении низкотемпературного подогрева. Такими способами возможно получать наплавленный металл в состоянии, близком к закаленному состоянию, и без образования трещин. Для повышения твердости применены комплексные технологии изготовления деталей горно-металлургического оборудования, в основе которых – использование плазменной наплавки в защитно-легирующей среде азота. В качестве дополнительных упрочняющих технологий используются термическая обработка наплавленного металла (высокотемпературный отпуск), химико-термическая обработка (азотирование) и ультразвуковая упрочняющая поверхностная обработка [5-10].

Данные о комплексном применении упрочняющих технологий для упрочнения теплостойкого металла в настоящее время представлены в недостаточном объеме и роль отдельных урочнящих технологий не уточнена [11].

Целью настоящей работы является исследование физических основ комплексных технологий упрочнения и оценка вклада плазменной наплавки в среде азота, термообработки и ультразвуковой упрочняющей обработки в повышение твердости и износостойкости наплавленных деталей.

Материал и методика исследования

В разработанных в Сибирским государственном индустриальном университете технологических процессах изготовления деталей горно-металлургического оборудования в качестве способа нанесения активного рабочего слоя предлагается использовать плазменную наплавку. Плазменная наплавка или наплавка сжатой дугой позволяет реализовать на практике термический цикл [12]. Предлагаемый термический цикл позволяет предотвратить образование холодных трещин, характерных для наплавки теплостойких сталей, и получать наплавленный металл в состоянии, близком к закаленному. Применение высококонцентрированных источников нагрева и сопутствующего охлаждения наплавляемой детали обеспечивает ограниченное время нагрева и повышенную скорость охлаждения в области высоких температур, что предотвращает рост зерна и распад аустенита с образованием равновесных низкопрочных структур. Для получения наплавленного металла с низкой склонностью к образованию трещин в процессе наплавки регулируется уровень временных напряжений путем их частичной релаксации за счет проявления эффекта кинетической пластичности в момент протекания мартенситного превращения [9]. В качестве высококонцентрированного источника нагрева выбрана низкотемпературная плазма. Температура в сжатых дугах колеблется в пределах 5000 – 30000 °С [5]. Эффективная тепловая мощность сжатой дуги и эффективный к.п.д. нагрева зависят от параметров режима (ток и напряжение дуги, расстояние от сопла плазмотрона до изделия, геометрия формирующего канала плазмообразующего сопла плазмотрона, расход плазмообразующего и защитного газов). Распределение теплового потока в пятне нагрева сжатой дуги во многом определяет ее технологические особенности и область применения, существенно влияет на температурное поле и определяет геометрию наплавляемого валика, глубину проплавления основного металла, величину зоны структурных превращений. При наплавке в этой области развиваются процессы, в результате которых изменяются свойства основного и наплавленного металла. Эти процессы влияют на кристаллизацию наплавленного металла, диффузионные процессы, образование прослоек, рост зерна аустенита.

Использование сжатой дуги обратной полярности позволяет проводить очистку наплавляемой поверхности от загрязнений непосредственно в процессе наплавки за счет эффекта катодного распыления, что обеспечивает необходимые условия смачиваемости поверхности изделия наплавляемым металлом и бездефектное формирование наплавленного слоя. При наплавке при использовании сжатой дуги обратной полярности достигается и меньшее разбавление наплавляемого металла основным. Использование азота в качестве защитного газа позволяет не только снизить затраты на на-

плавку, но и эффективно легировать наплавленный металл азотом непосредственно из газовой фазы. Исходя из этих соображений, в качестве источника нагрева выбрана низкотемпературная плазма, горящая в среде азота на обратной полярности.

Для реализации способа многослойной плазменной наплавки разработаны порошковые проволоки. Шихта для проволок содержит углерод, хром, молибден, вольфрам, ванадий, алюминий, железо, никель, пыль электрофильтров производства алюминия. В состав шихты дополнительно введены азотированный феррохром и титан. Порошковые проволоки обеспечивают получение наплавленного металла стали Р2М9Ю и Р18Ю [13, 14].

Замена хрома на азотированный феррохром и введение титана позволяют повысить содержание азота в наплавленном металле с 0,02 – 0,04 % при наплавке в азотсодержащей защитно-легирующей среде до 0,06 – 0,08 %. Введение в состав наплавленного металла сильного стабилизатора аустенита, азота и титана повышает количество остаточного аустенита и уменьшает объемный эффект мартенситного превращения, что снижает вероятность образования холодных трещин.

Порошковые проволоки предназначены для упрочнения деталей машин, работающих в условиях абразивного износа. Диаметр порошковой проволоки 2,7 – 3,7 мм, коэффициент наплавки 18 – 20 Г/А·ч, коэффициент разбрызгивания не более 3,5 %. Твердость наплавленного металла составляет 59 – 60 HRC, а после высокотемпературного отпуска 62 – 64 HRC.

Для плазменной наплавки использовали установку УД-417. Наплавку вели с присадкой порошковой проволоки ПП-Р2М9Ю диаметром 3,7 мм на заготовки из стали 30ХГСА. Наплавку проводили по винтовой линии с шагом 10 – 12 мм при следующем режиме: сварочный ток $I_{св} = 240 \div 260$ А, напряжение на дуге $U_д = 50 \div 55$ В, $V_н = 18$ м/ч, скорость подачи порошковой проволоки $V_{п.п.} = 60$ м/ч, смещение с зенита 10 – 12 мм, длина дуги $l_д = 20$ мм.

Многослойную плазменную наплавку проводили по термическому циклу, схема которого представлена на рис.1. Температура предварительного и сопутствующего подогрева находилась в интервале 250 – 300 °С. Точка снижения температуры для релаксации напряжений в процессе мартенситного превращения составляла150 – 200 °С.

Наружные и внутренние дефекты наплавки при визуальном осмотре валков, а также методами ультразвуковой и магнитной дефектоскопии не обнаружены. Качество наплавленной поверхности удовлетворительное [5, 10].

В работе исследовали влияние термической обработки, азотирования и ультразвуковой упрочняющей поверхностной обработки на твердость и фазовый состав наплавленной теплостойкой стали Р18 следующего химического состава: 0,86 % С; 4,84 % Cr; 17,0 % W; 5,40 % Mo; 0,50 % V; 0,65 % Al; 0,06 % N.

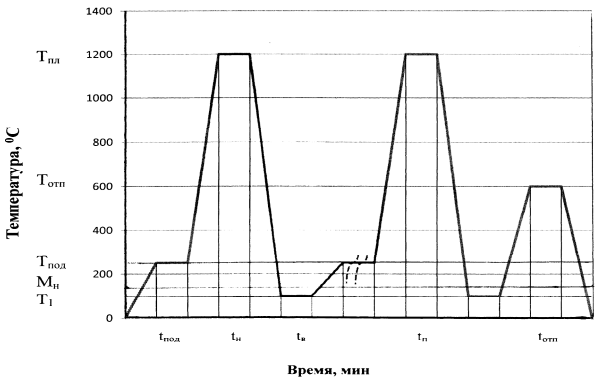

Рис.1. Схема термического цикла многослойной плазменной наплавки в среде азота

Fig.1. Scheme of the thermal cycle of multilayer plasma surfacing in a nitrogen medium

В качестве основного металла выбрана сталь 30ХГСА, обладающая комплексом высоких механических свойств (состав 0,3 % С; 0,9 – 1,1 % Cr; 0,8 – 1,1 % Mn; 0,9 – 1,2 % Si).

Из верхних слоев наплавленного металла на станке электроискровой резки вырезали образцы. Половину образцов от партии подвергали термической обработке, режимы которой в случае наплавленных образцов выбирали из рекомендаций для близких по составу Р18 кованых сталей (температура нагрева 580 °С время выдержки 1 ч, число отпусков 4). Влияние высокотемпературного отпуска на твердость поверхности оценивали по методу Роквелла.

Наплавленный в среде азота металл подвергали газовому азотированию в атмосфере газообразного аммиака (температура нагрева 560 °С, время выдержки 20 – 30 ч, степень диссоциации 35 – 45 %).

В работе проводили ультразвуковую обработку дисков, вырезанных из наплавленных прокатных валков диаметром 100 мм, рабочий слой которых соответствовал сплаву Р18Ю. Использовали ультразвуковой станок модели

4Д772Э, который обеспечивает рабочую частоту задающего генератора в пределах от 20,5 до 27 кГц. В качестве инструмента применяли составной концентратор с экспоненциальным переходным участком (коэффициент усиления 10) из стали 35 с наконечником из стали ШХ15 диаметром 8 мм.

Исследования структурно-фазового состояния проводили методом растровой электронной микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа на приборе Leo EVO 50XVP (Карл Цейс, Германия) [15 – 7].

Результаты и их обсуждение

На рис.2 показаны изображения травленых шлифов образцов, вырезанных из средней части наплавленного слоя после плазменной наплавки без термообработки и после высокотемпературного отпуска. На рис.2а наблюдается ориентированная дендритная структура.

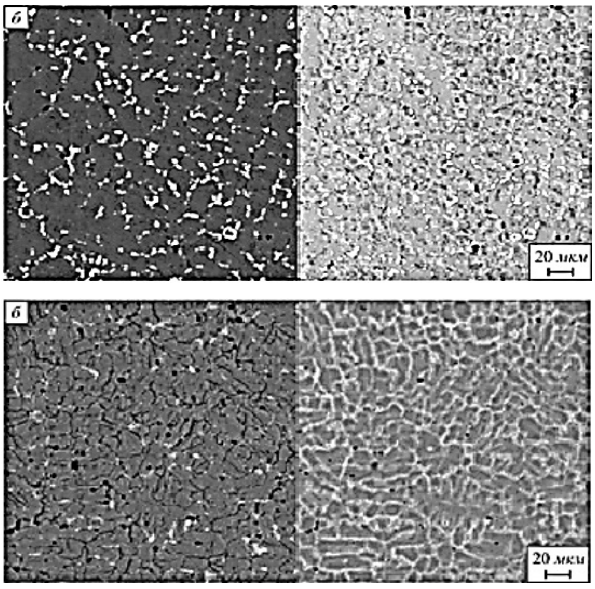

Рис.2. Структура наплавленного металла сплава Р18Ю после наплавки (а) и после наплавки и высокотемпературного отпуска (б)

Fig.2. The structure of the deposited metal of the P18YU alloy after surfacing (a) and after surfacing and high-temperature tempering (б)

Основная часть исследуемого сплава представляет собой перлитные зерна. В стыках и по границам зерен располагается цементит, который представляет собой карбид железа Fe_3C и соединения на основе железа, вольфрама и молибдена переменного состава (Fe_4W_2N, $FeWN_2$ и Fe_4W_2C). Присутствует также нитрид алюминия. После наплавки с высокотемпературным отпуском (рис.2б) ориентированная дендритная структура практически не просматривается. Видны более четкие границы перлитных зерен. В стыках и по границам зерен располагается сложный карбонитрид на основе металлов состава Me_6NC. Наружные и внутренние дефекты наплавки (поры, трещины и шлаковые включения) и дефекты микроструктуры (крупное зерно, химическая и структурная неоднородность и др.) не наблюдаются [6].

Твердость поверхностного слоя, сформированного плазмой в среде азота при выбранных режимах наплавки, составляет 52 – 57 HRC в зависимости от состава порошковой проволоки. Структура наплавленного сплава блика к структуре теплостойкого сплава Р18 в закаленном состоянии и состоит из мартенсита (около 60 %), карбонитридов (до 20 %) и остаточного аустенита (до 20 %).

Влияние количества высокотемпературных отпусков на твердость наплавленного сплава показано на рис.3. Проведение трехчетырехкратного высокотемпературного отпуска позволяет увеличить твердость наплавленного в азоте сплава до 63 – 65 HRC. Увеличение твердости за счет проведения высокотемпературного отпуска объясняется превращением остаточного аустенита в мартенсит, эффектом дисперсионного твердения и образованием карбонитридов.

Увеличение твердости по сравнению с обычной (ненаплавленной сталью) связано с дополнительным легированием сплава азотом в процессе плазменной наплавки. Замена хрома на азотированный феррохром и введение в состав шихты порошковой проволоки позволяет повысить содержание азота в наплавленном металле в 1,5 – 2,0 раза с 0,02 – 0,04 % при наплавке в азотсодержащей защитно-легирующей среде до 0,06 – 0,08 %. Введение в состав наплавленного металла сильного стабилизатора аустенита азота повышает количество остаточного аустенита и уменьшает объемный эффект мартенситного превращения, что снижает вероятность образования холодных трещин. Введение азотированного феррохрома и титана в состав шихты позволяет увеличить количество карбонитридной фазы. Получение наплавленного металла повышенной твердости и износостойкости достигается трех-четырехкратным высокотемпературным отпуском остаточного аустенита при 560 – 580 °С. При от-

пуске азот выделяется из мартенсита, переходя как в цементитный карбид, так и в карбиды легирующих элементов, и образует нерастворимые мелкодисперсные нитриды и карбонитриды. Азот, увеличивая количество карбонитридной фазы и устойчивость против обратимого разупрочнения, повышает твердость и износостойкость

Комплексное легирование наплавленного металла азотом при плазменной наплавке в азотсодержащей защитно-легирующей среде, введение азотированного феррохрома, наличие алюминия в шихте порошковой проволоки и дополнительное введение в ее состав титана позволяет повысить твердость, износостойкость и теплостойкость.

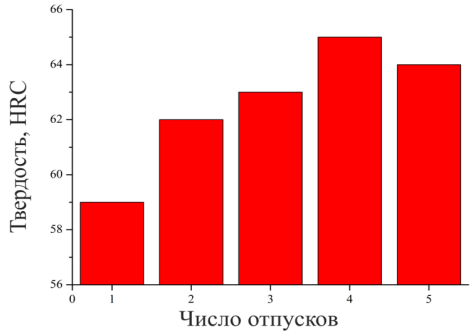

Рис.3. Влияние количества высокотемпературных отпусов на твердость наплавленного металла

Fig.3. Influence of the number of high-temperature drops on the hardness of the deposited metal

Твердость наплавленного металла возрастает на 1 – 2 HRC, но при этом значительно повышается износостойкость и теплостойкость (на 25 – 50 °С). Износостойкость улучшается из-за увеличения количества выделяющихся фаз – упрочнителей (нитридов алюминия и титана).

Исследования микротвердости наплавленного металла показали, что наплавленный металл после наплавки находится в состоянии, близком к состоянию закаленного (высокая твердость). Многослойную плазменную наплавку проводили по винтовой линии с перекрытием валиков, поэтому металл подвергался сложному термическому воздействию. Такой способ наплавки приводит к неравномерности твердости и, особенно, микротвердости. Для повышения износостойкости эту неравномерность твердости и микротвердости необходимо устранить, для чего и предлагается применять высокотемпературный отпуск. Высокотемпературный отпуск приводит к повышению микротвердости и к уменьшению неравномерности микротвердости.

Попытки использования наплавленного металла для последующего газового азотирования в газообразной атмосфере показали, что на наплавленных высоколегированных сплавах типа сплава Р18 не удается получить глубину слоя более 0,20 – 0,25 мм с твердостью после азотирования порядка 1100 – 1240 HV. Введение дополнительной упрочняющей технологии в виде азотирования для наплавленного теплостойкого металла целесообразно в тех случаях, когда требуются повышенные твердость и, особенно, коррозионная стойкость.

Проведенные исследования показали, что влияние ультразвуковой обработки на упрочнение наплавленного металла нельзя оценивать однозначно. При определенных значениях интенсивности ультразвуковой обработки возможно снижение тех или иных показателей упрочненного слоя. Однако существует область оптимальных значений (нормальное усилие на инструмент $P_н$ = 10 Н, амплитуда колебаний А = 20 мкм, скорость обработки V = 20 м/мин) технологических факторов ультразвуковой поверхностной обработки, в пределах которой наблюдается резкое увеличение всех характеристик упрочненного слоя наплавленного металла. Механизм ультразвукового поверхностного упрочнения аналогичен действию наклепа. При пластической деформации происходит измельчение зерна, дробление крупных дендритов, кроме того дополнительное упрочнение обусловлено ростом микроискажений кристаллической решетки. Эффективность ультразвука объясняется снижением сопротивления поверхностных слоев металла поверхностному деформированию. Это вызвано изменением кинематики деформирования поверхностных слоев, а также возникновением в обрабатываемой детали упругих ультразвуковых колебаний.

Исследования влияния ультразвуковой обработки на свойства наплавленного слоя показали возможность получения благоприятной эпюры остаточных напряжений, увеличения твердости и микротвердости поверхности обработанных образцов, получения оптимальной микроструктуры поверхностного слоя наплавленного металла. При оптимальных параметрах процесса и базовой твердости наплавленного металла 64 HRC возможно ее увеличение на 1 – 2 HRC, что является резервом повышения

эксплуатационных характеристик наплавленных валков холодной прокатки.

Промышленные испытания показали, что изготовленные с применением комплексных технологий упрочнения на базе плазменной наплавки активного слоя теплостойкими сталями высокой твердости наплавленные детали обладают повышенной (в 1,5 – 2,0 раза) стойкостью по сравнению со стойкостью серийных изделий.

Заключение

Установлено, что физическая основа упрочнения теплостойкого наплавленного металла при использовании комплексных технологий обусловлена применением новых способов многослойной плазменной наплавки в среде азота и новых наплавочных материалов, обеспечивающих получение наплавленного металла в состоянии, близком к закаленному состоянию с твердостью поверхности 55 – 57 HRC и низкой склонностью к образованию холодных трещин. Основой способов является регулируемый термический цикл с низкотемпературным подогревом до температуры 230 – 250 °С и использование эффекта кинетической пластичности. Основной дополнительный вклад в упрочнение наплавленного сплава вносит высокотемпературный отпуск при температуре 560 – 580 °С (8 – 10 HRC) и ультразвуковая обработка при оптимальных режимах (нормальное усилие на инструмент $P_н$ = 10 Н, амплитуда колебаний А = 20 мкм, скорость обработки V = 20 м/мин), что обеспечивает общее увеличение твердости до 65 – 66 HRC. Выявлены физические основы формирования структуры и свойств теплостойкого металла плазменной наплавкой в среде азота. Установлено, что в наплавленном металле основными фазами являются твердый раствор α-Fe, карбиды и карбонитриды на основе железа, вольфрама, хрома, молибдена, алюминия (Fe_6W_6NC и AlN).

Список литературы

1. Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. Специальные стали. М.: МИСИС, 1999. 408 с.

2. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. М.: Металлургия, 1975. 584 с.

3. Фрумин И.И. Автоматическая электродуговая наплавка. Харьков: Металлургиздат, 1961. 421 с.

4. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б.Е. Патона. М.: Машиностроение, 1974. 768 с.

5. Малушин Н.Н., Валуев Д.В. Обеспечение качества деталей металлургического оборудования на всех этапах их жизненного цикла путем применения плазменной наплавки теплостойкими сталями. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. 358 с.

6. Кайбышев О.А. Пластичность и сверхпластичность металлов. М.: Металлургия, 1995. 280 с.

7. Сверхпластичность металлических материалов / Под ред. М.Х. Шоршорова. М.: Наука, 1993. 220 с.

8. Применение эффекта сверхпластичности сталей в инструментальном производстве / С.Ф. Гнюсов и др. Томск: Изд-во НТЛ, 2008. 237 с.

9. Малушин Н.Н., Громов В.Е., Романов Д.А., Бащенко Л.П., Ковалев А.П. Эффект кинетической пластичности и его применение при плазменной наплавке теплостойких сплавов с низкотемпературным подогревом // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2021. Т. 18, № 2. С. 180–187.

10. Малушин Н.Н. Технология изготовления прокатных валков плазменной наплавкой теплостойкими сталями высокой твердости. В кн.: Влияние высокоэнергетических воздействий на структуру и свойства конструкционных материалов. Серия «Фундаментальные проблемы современного материаловедения». В 2-х т. Т. 2 / Под ред. В.Е. Громова. Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2013. С. 290–297.

11. Современные тенденции модифицирования структуры и свойств материалов / Под общ. ред. Н.Н. Коваля и В.Е. Громова. Томск: Изд-во НТЛ, 2015. 380 с.

12. Пат. № 2699488 РФ. Способ многослойной наплавки теплостойкими сталями высокой твердости в азотсодержащей среде / Н.Н. Малушин, Д.А. Романов, В.Л. Осетковский, А.П. Ковалев, Е.А. Будовских, Д.В. Валуев; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Сибирский гос. индустриальный университет. Заявл. 29.02.2019; опубл. 05.09.2019. Бюл. № 25.

13. Пат. № 26344526 РФ. Шихта порошковой проволоки / Н.Н. Малушин, Е.А. Будовских, С.Б. Сапожков, Д.В. Валуев, В.Л. Осетковский, А.П. Ковалев, И.В. Осетковский. Заявл. 07.12.2016; опубл. 31.10.2017. Бюл. № 31.

14. Пат. № 2681049 РФ. Шихта порошко-

вой проволоки для наплавки в азотсодержащей среде / Н.Н. Малушин, Е.А. Будовских, В.Л. Осетковский, А.П. Ковалев, И.В. Осетковский, Р.А. Гизатулин. Заявл. 21.11.2017; опубл. 01.03.2019. Бюл. № 7.

15.Голдстейн Дж., Ньюбери Д., Эчлин П. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ. М.: Мир, 1984. 303 с.

16. Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электроннооптический анализ. М.: изд. МиСиС, 1994. 328 с.

17. Малушин Н.Н., Романов Д.А., Ковалев А.П., Осетковский В.Л., Бащенко Л.П. Структурно-фазовое состояние теплостойкого сплава высокой твердости, сформированного плазменной наплавкой в среде азота и высокотемпературным отпуском // Известия высших учебных заведений. Физика. 2019. Т. 62, № 10 (742). С. 106–111.

Информация об авторах

Н. Н. Малушин – кандидат технических наук, доцент, ведущий инженер кафедры естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля Сибирского государственного индустриального университета.

В. Е. Громов – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля Сибирского государственного индустриального университета.

Д. А. Романов – доктор технических наук, старший научный сотрудник Управления научных исследований Сибирского государственного индустриального университета.

Л. П. Бащенко – кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетики и экологии Сибирского государственного индустриального университета.

А. П. Ковалев – инженер, директор аглофабрики АО «Кузнецкивестстрой».

К. В. Соснин – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Управления научных исследований Сибирского государственного индустриального университета.

References

1. Gol'dshtein, M. I., Grachev, S. V. & Veksler, Yu. G. (1999). *Spetsial'nye stali [Special steel]*. Moscow: MISIS. P. 408. (In Russ.).

2. Geller, Yu. A. (1975). *Instrumental'nye stali [Instrumental steel]*. Moscow: Metallurgiya. P. 584. (In Russ.).

3. Frumin, I. I. (1961). *Avtomaticheskaya elektrodugovaya naplavka [Automatic electric arc surfacing]*. Khar'kov: Metallurgizdat. P. 421. (In Russ.).

4. Paton, B. E. (1974). *Tekhnologiya elektricheskoi svarki metallov i splavov plavleniem [Technology of electric welding of metals and alloys by melting]*. Moscow: Mashinostroenie. P. 768. (In Russ.).

5. Malushin, N. N. & Valuev, D. V. (2013). *Obespechenie kachestva detalei metallurgicheskogo oborudovaniya na vsekh etapakh ikh zhiznennogo tsikla putem primeneniya plazmennoi naplavki teplostoikimi stalyami [Quality assurance of metallurgical equipment parts at all stages of their life cycle by using plasma surfacing with heat-resistant steels]*. Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. P. 358. (In Russ.).

6. Kaibyshev, O. A. (1995). *Plastichnost' i sverkhplastichnost' metallov [Plasticity and superplasticity of metals]*. Moscow: Metallurgiya. P. 280. (In Russ.).

7. Shorshorov, M. Kh. (1993). *Sverkhplastichnost' metallicheskikh materialov [Superplasticity of metallic materials]*. Moscow: Nauka. P. 220. (In Russ.).

8. Gnyusov, S. F. etc. (2008). *Primenenie effekta sverkhplastichnosti stalei v instrumental'nom proizvodstve [Application of the effect of superplasticity of steels in tool production]*. Tomsk: Izd-vo NTL. P. 237. (In Russ.).

9. Malushin, N. N., Gromov, V. E., Romanov, D. A., Bashchenko, L. P. & Kovalev, A. P. (2021). The effect of kinetic plasticity and its application in plasma surfacing of heat-resistant alloys with low-temperature heating. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS))*. 2(18), 180–187. (In Russ.).

10. Malushin, N. N. (2013). Manufacturing technology of mill rolls by plasma surfacing with heat-resistant steels of high hardness. In: Influence of high-energy impacts on the structure and properties of structural materials. *Series "Fundamental Problems of Modern Materials Science". Vol. 2. Gromov V.E. ed. Novokuznetsk: izd. SibGIU*, 290–297. (In Russ.).

11. (2015). *Sovremennye tendentsii modifitsirovaniya struktury i svoistv materialov [Modern trends in modifying the structure and properties of*

materials]. Pod obshch. red. N. N. Kovalya, V. E. Gromova. Tomsk: Izd-vo NTL. P. 380. (In Russ.).

12. Malushin, N. N., Romanov, D. A., Osetkovskii, V. L., Kovalev, A. P., Budovskikh, E. A. & Valuev, D. V. (2019). Sposob mnogosloinoi naplavki teplostoikimi stalyami vysokoi tverdosti v azotsoderzhashchei srede [The method of multi-layer surfacing with heat-resistant steels of high hardness in a nitrogen-containing environment]. Patent no. 2699488 RF. Byul. no. 25. (In Russ.).

13. Malushin, N. N., Budovskikh, E. A., Sapozhkov, S. B., Valuev, D. V., Osetkovskii, V. L., Kovalev, A. P. & Osetkovskii, I. V. (2017). Shikhta poroshkovoi provoloki [Powder wire charge] Patent no. 26344526 RF. Byul. no. 31. (In Russ.).

14. Malushin, N. N., Budovskikh, E. A., Osetkovskii, V. L., Kovalev, A. P., Osetkovskii, I. V. & Gizatulin, R. A. (2017). Shikhta poroshkovoi provoloki dlya naplavki v azotsoderzhashchei srede [Charge of powder wire for surfacing in a nitrogen-containing medium] Patent no. 2681049 RF. Byul. no. 7. (In Russ.).

15.Goldstein, Dzh., N'yuberi, D. & Echlin, P. (1984). *Rastrovaya elektronnaya mikroskopiya i rentgenovskii mikroanaliz [Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis]*. M.: Mir. P. 303. (In Russ.).

16. Gorelik, S. S., Skakov, Yu. A. & Rastorguev, L. N. (1994). *Rentgenograficheskii i elektronnoopticheskii analiz [Radiographic and electron-optical analysis]*. M.: izd. MiSiS. P. 328. (In Russ.).

17. Malushin, N. N., Romanov, D. A., Kovalev, A. P., Osetkovskii, V. L. & Bashchenko, L. P. (2019). Structural and phase state of a heat-resistant high-hardness alloy formed by plasma surfacing in a nitrogen medium and high-temperature tempering. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika*. 62, 10 (742), 106–111. (In Russ.).

Information about the authors

N. N. Malushin – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Engineer of the Department of Natural Sciences named after prof. V.M. Finkel of the Siberian State Industrial University.

V. E. Gromov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Natural Sciences named after prof. V.M. Finkel of the Siberian State Industrial University.

D. A. Romanov – Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher of the Department of Scientific Research of the Siberian State Industrial University.

L. P. Bashchenko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Heat and Power Engineering and Ecology of the Siberian State Industrial University.

A. P. Kovalev – Engineer, Director of the sinter plant of JSC "Kuznetskiveststroy".

K. V. Sosnin – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of the Scientific Research Department of the Siberian State Industrial University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 05.10.2021; одобрена после рецензирования 22.10.2021; принята к публикации 03.11.2021.

The article was received by the editorial board on 05 Oct. 21; approved after reviewing 22 Oct. 21; accepted for publication 03 Nov. 21.