

Артемьев А.А., Зорин И.В., Соколов Г.Н., Лысак В.И., Денисевич Д.С., Прияткин Д.В. Диагностика наплавленных сплавов на стойкость к высокотемпературному газоабразивному изнашиванию // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2019. – Т. 21, № 1. – С. 12–19. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.1.02

Artem'ev A.A., Zorin I.V., Sokolov G.N., Lysak V.I., Denisevich D.S., Priyatkin D.V. Diagnostics of weld alloys for resistance to high-temperature gas-abrasive wear. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 12–19. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.1.02

**ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 21, № 1, 2019**

Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science

<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2019.1.02

УДК 620.178.165

А.А. Артемьев, И.В. Зорин, Г.Н. Соколов, В.И. Лысак, Д.С. Денисевич, Д.В. Прияткин

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

**ДИАГНОСТИКА НАПЛАВЛЕННЫХ СПЛАВОВ НА СТОЙКОСТЬ
К ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМУ ГАЗОАБРАЗИВНОМУ ИЗНАШИВАНИЮ**

Целью работы являлась разработка конструкции установки и методики экспресс-испытаний термо- и износостойких наплавленных сплавов на стойкость к газоабразивному изнашиванию при нормальной и повышенных до 1000 °С значениях температуры. Принцип действия разработанной установки основан на ускорении абразивных частиц потоком горячего сжатого воздуха и их соударении под заданным углом с поверхностью нагретого образца испытываемого сплава. Модульная конструкция установки состоит из следующих основных систем: подготовки сжатого воздуха, подачи абразивного материала, плазменного нагрева газоабразивного потока, позиционирования образца относительно газоабразивного потока, нагрева испытываемого образца, очистки отработанного воздуха. Установка позволяет использовать абразив с различным компонентным и гранулометрическим составом, а также варьировать его скорость в широком диапазоне значений. Предложены критерии износостойкости материалов, обеспечивающие достоверную оценку и воспроизводимость результатов испытаний образцов сплавов различного состава. Показана геометрия пятна износа и топология тепловых полей на поверхности испытываемых образцов.

Приведены результаты изучения механизмов высокотемпературного изнашивания сплава на основе алюминиды никеля 10X4H76M3B3Ю11PЦ, легированного частицами ZrB₂. Показано, что износ сплава при температуре 1000 °С носит комплексный окислительно-абразивный характер. Сопrotивлению металла пластической деформации при ударном воздействии абразивных частиц способствует твердорастворное упрочнение сплава, а также его армирование ультрадисперсными интерметаллидными фазами, формирующимися при его легировании тугоплавкими химическими элементами.

Разработанная методика испытаний позволяет моделировать условия работы наплавленных деталей металлургического, энергетического и другого оборудования, например, лопаток эксгаустеров котлов и агломерационных машин, деталей засыпных устройств доменных печей и др.

Ключевые слова: наплавленный металл, алюминид никеля, борид циркония, износостойкость, газоабразивное изнашивание, диагностика, экспресс-испытания, температура, пластическая деформация, окисление.

A.A. Artem'ev, I.V. Zorin, G.N. Sokolov, V.I. Lysak, D.S. Denisevich, D.V. Priyatkin

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation

**DIAGNOSTICS OF WELD ALLOYS FOR RESISTANCE
TO HIGH-TEMPERATURE GAS-ABRASIVE WEAR**

The aim of the work was to develop the installation design and methods for rapid testing of thermal and wear-resistant weld alloys for resistance to gas-abrasive wear at normal temperatures and elevated temperatures up to 1000 °C. The principle of operation of the developed installation is based on the acceleration of abrasive particles with a stream of hot compressed air and their collision at a given angle with the surface of the heated sample of the test alloy. The modular design of the installation consists of the following main systems: compressed air preparation; supply of abrasive material; plasma heating of a gas-abrasive stream; positioning the sample relative to the gas abrasive flow; heating the test specimen; exhaust air purification. The installation allows the use of abrasive with different component and particle size distribution, as well as vary its speed in a wide range of values. Criteria of wear resistance of materials are proposed, providing reliable assessment and reproducibility of test results for samples of alloys of different composition. The geometry of the wear spot and the topology of thermal fields on the surface of the tested samples are shown.

The results of studying the mechanisms of high-temperature wear of the alloy based on nickel aluminide 10Cr4Ni76Mo3W3Al11BZr doped with ZrB₂ particles are presented. It is shown that the wear of the alloy at a temperature of 1000 °C is complex oxidative-abrasive. The resistance of the metal to plastic deformation under the impact of abrasive particles contributes to the solid-solution hardening of the alloy, as well as its reinforcement with ultrafine intermetallic phases, which are formed during its alloying with refractory chemical elements.

The developed test method allows to simulate the operating conditions of the deposited parts of metallurgical, energy and other equipment, for example, the blades of exhausters of boilers and sintering machines, parts of charging devices of blast furnaces, etc.

Keywords: weld metal, nickel aluminide, zirconium boride, wear resistance, gas-abrasive wear, diagnostics, rapid tests, temperature, plastic deformation, oxidation.

Введение

Детали металлургического, энергетического и другого оборудования, такие как лопатки эксгаустеров котлов и агломерационных машин, турбин газоперекачивающих агрегатов, детали засыпных устройств доменных печей и другие, работают в сложных условиях высокотемпературного газоабразивного изнашивания [1]. Соприкасаясь с потоками разогретых газов, несущих абразивные частицы, поверхности деталей нагреваются до высоких значений (500–1000 °С) температуры и интенсивно изнашиваются в условиях окисления и многократного ударного воздействия абразива. Проблема повышения ресурса таких изделий эффективно решается наплавкой их рабочих поверхностей износостойкими сплавами. Вместе с тем недостаточные эксплуатационные свойства металла, наплавленного выпускаемыми промышленностью материалами, обуславливают необходимость создания новых наплавочных сплавов, в том числе легированных ультрадисперсными частицами тугоплавких химических соединений [6–8]. В процессе разработки таких сплавов остро встает вопрос экспресс-диагностики их износостойкости в сравнении с аналогами. Вместе с тем стандартизированные методики испытаний материалов на газоабразивное изнашивание при повышенной температуре отсутствуют, а экспериментальные [9–11] имеют существенные ограничения, не позволяющие в полной мере моделировать реальные условия работы различных деталей, эксплуатирующихся в широком температурном диапазоне. Наиболее перспективной концепцией при разработке испытательных установок, очевидно, является реализация в их конструкции принципа ускорения абразивных частиц потоком горячего сжатого воздуха и их соударения под заданным углом с поверхностью нагретого образца из испытуемого материала [12].

Целью настоящей работы являлась разработка конструкции установки и методики экспресс-испытаний термо- и износостойких наплавленных сплавов на стойкость к газоабразивному изнашиванию при нормальной и повышенных до 1000 °С значениях температуры.

Методика проведения исследований

Спроектирована и изготовлена лабораторная установка (рис. 1), состоящая из герметичной испытательной камеры, в которой располагаются плазматрон, образец и абразивоструйное сопло с позиционирующими устройствами; компрессора, источников тока, систем подачи абразивного материала и плазмообразующих газов, а также системы воздухоочистки.

Образец из исследуемого сплава представляет собой пластину размером 40×16×3 мм, на боковых гранях которой изготовлены токоподводящие площадки. Устройство позиционирования образца путем его вращения относительно неподвижного абразивоструйного сопла обеспечивает углы атаки образца газоабразивным потоком в диапазоне 20°–90° с шагом 5°. Конструкция устройства позиционирования сопла обеспечивает плавную регулировку расстояния от сопла до образца в диапазоне 20–50 мм, а также поперечное и продольное перемещение сопла, необходимые для формирования пятна износа строго в центральной части образца при различных углах атаки.



а



б

Рис. 1. Общий вид лабораторной установки (а) и испытательной камеры (б): 1 – герметичная испытательная камера; 2 – система подачи абразивного материала; 3 – блок управления плазматроном; 4 – система подачи плазмообразующих газов; 5 – система воздухоочистки; 6 – станина; 7 – образец; 8 – водоохлаждаемые токоподводы; 9 – устройство позиционирования образца; 10 – абразивоструйное сопло; 11 – устройство позиционирования сопла; 12 – плазматрон. Компрессор, источники постоянного тока для нагрева образца и питания плазматрона не показаны

Нагрев газообразного потока осуществляется на выходе его из сопла посредством смешения со струей высокотемпературной аргон-азотной плазмы, генерируемой малогабаритным плазмотроном. При этом плавное регулирование температуры потока осуществляется путем изменения силы тока и напряжения в плазмотроне.

Нагреватель образца изготовлен в виде двух медных водоохлаждаемых токоподводов, подключенных к сварочному источнику тока ВДУ-1000, между которыми зажимается образец. Это позволяет обеспечить быстрый нагрев образца проходящим через него током до температуры 1000 °С при любом расходе и температуре газообразного потока. Данный способ нагрева доказал свою высокую эффективность в разработанной ранее методике испытаний наплавленного металла на стойкость к изнашиванию при трении об абразивную прослойку [13, 14], а также в процессе склерометрических испытаний [15, 16].

Стабильность температурного режима испытаний обеспечивали постоянным контролем температуры образца посредством термопары ВР5/20, подключенной к аналого-цифровому преобразователю ЛА-20 USB, обеспечивающему вывод показаний на экран персонального компьютера. Изучение тепловых полей на поверхности образца выполняли с использованием тепловизора SAT HotFind-LTHT.

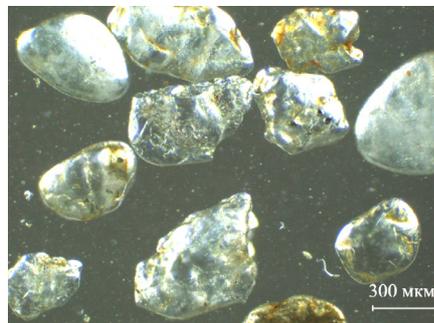
Система подачи абразивного материала предусматривает использование порошков кварцевого песка, электрокорунда, железной окалины и так далее со средним размером частиц 50–500 мкм. В процессе испытаний применяли кварцевый песок Орловского-3 месторождения Волгоградской области, морфологический анализ которого показал, что округлую форму имеет 63 % частиц, остроугольную, характеризующуюся более высокой абразивной способностью, – 37 % (рис. 2, а). Подготовка абразивного материала заключается в его сепарации на определенные фракции (рис. 2, б) с помощью комплекта сит и просушке для удаления влаги.

Безопасное для оператора функционирование испытательной установки обеспечивает двухступенчатая система очистки отработанного воздуха от абразивной пыли, включающая инерционный пылеуловитель типа «циклон» и фильтрующий пылеуловитель, которые обеспечивают задержание частиц размером до 1–3 мкм.

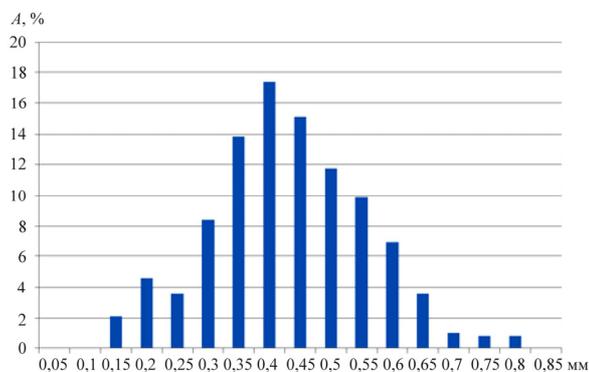
Технологические возможности разработанной установки и параметры режима испытаний приведены в таблице.

Обработку методики испытаний при температуре до 700 °С производили на образцах из жаро-

стойкой стали AISI 316Ti (аналог 10X17H13M2T). При температуре до 1000 °С использовали образцы наплавленного электродуговым способом сплава на основе алюминид никеля 10X4H76M3B3Ю11РЦ, легированного 1,5 мас. % частиц ZrB₂.



а



б

Рис. 2. Морфология кварцевого песка (а) и результаты его гранулометрического анализа после просева на фракцию 250–500 мкм (б)

Параметры режима испытаний

№ п/п	Параметр	Значение
1	Диапазон углов атаки газоабразивной струи, град	20–90
2	Диапазон регулировки расстояний от сопла до образца, мм	20–50
3	Температура испытаний, °С	до 1000
4	Ток в плазмотроне, А	60–250
5	Ток нагрева образца, А	120–600
6	Расход плазмообразующих газов, л/мин: азот аргон	0,5–0,7 2,0–2,5
7	Расход охлаждающей воды, л/мин	2–3
8	Максимальный расход сжатого воздуха, л/мин	440
9	Давление сжатого воздуха, МПа	0,2–0,5
10	Средний размер частиц абразива, мкм	50–500
11	Время испытания, с	120
12	Минимальный расход абразива, г/мин	195

В качестве критерия износостойкости предложено использовать величину удельного износа (г/кг):

$$I = \Delta m / m_a, \quad (1)$$

где Δm – потеря массы образца сплава, измеренная с точностью 0,1 мг, г; m_a – масса затраченного в процессе испытания абразива, кг. Потерю массы испытанных образцов измеряли на аналитических весах VIBRA NT-124RCE с точностью до 0,1 мг.

При необходимости сравнения сплавов с отличающимися значениями плотности критерием износостойкости служит относительная износостойкость:

$$\varepsilon = \frac{I_3 \rho_{и1}}{I_{и1} \rho_3}, \quad (2)$$

где I_3 , $I_{и1}$ – удельный износ эталонного и испытуемого образцов соответственно; ρ_3 , $\rho_{и1}$ – плотность эталонного и испытуемого образцов соответственно, измеренная гидростатическим методом.

Структуру и элементный состав структурных составляющих наплавленного металла изучали с использованием оптического (Carl Zeiss Axiovert 40 MAT) и двулучевого электронно-ионного (FEI Versa 3D с системой микрорентгеноспектрального анализа) микроскопов. Рентгеноструктурный анализ металла производили на дифрактометре ДРОН-3М.

Результаты исследований и их обсуждение

Установлено, что варьирование силы тока, проходящего через образцы, изготовленные из наплавленных сплавов, в диапазоне 120–600 А обеспечивает высокоскоростной нагрев их рабочих участков в диапазоне значений температуры от комнатной до 1000 °С.

При уменьшении угла атаки образца газоабразивным потоком от 90° до 20° контур пятна износа на поверхности образца изменяет свою форму от круговой до эллиптической (рис. 3, а). При этом ось газоабразивного потока необходимо смещать к одному из токоподводов, что может нарушить равномерность теплового поля образца в пятне износа. Так, при заданной температуре испытаний 650 °С и без нагрева газоабразивного потока с углом атаки 30° температурный градиент между точками 1 и 2 составляет ~75 °С. Сочетание нагрева образца с плазменным нагревом потока обуславливает снижение градиента до величины ~20 °С. Показано (рис. 3, б), что разработанная методика испытаний позволяет обеспечить практически равные температурные условия изнашивания поверхностных микрообъемов образца по всей площади его контакта с газоабразивным потоком.

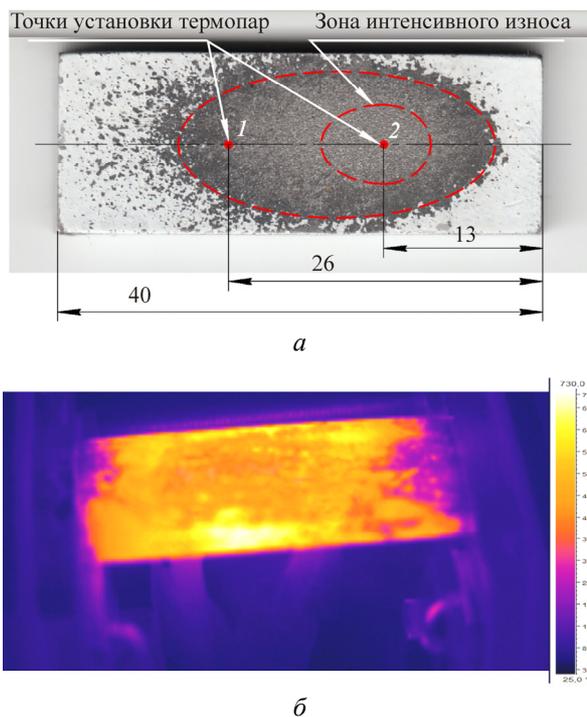


Рис. 3. Пятно износа (а) и топология теплового поля (б) на поверхности образца из стали AISI 316Ti при угле атаки газоабразивного потока 30°

Экспериментально установлен диапазон соотношений аргона и азота (3:1)–(4:1), а также суммарного расхода плазмообразующих газов (2–3 л/мин), обеспечивающих высокую энтальпию вырабатываемой плазмы и стабильное существование плазменной струи в условиях воздействия высокоскоростного газоабразивного потока (рис. 4).



Рис. 4. Нагрев воздушного потока плазменной струей

Варьирование давления воздуха на входе в сопло диаметром 2 мм в диапазоне от 0,2 до 0,5 МПа обеспечивает соударение абразивных частиц с поверхностью исследуемого образца со скоростью не менее 50 м/с и позволяет в широких пределах управлять интенсивностью изнашивания. Установлено, что при использовании в качестве абразива

кварцевого песка при его соударении с поверхностью нагретого образца происходит разрушение абразивных частиц, что изменяет их исходную морфологию и гранулометрический состав, поэтому повторное использование абразива недопустимо.

Металлографический и рентгеноструктурный анализ наплавленного металла 10X4H76M3B3Ю11PЦ показали, что он состоит из твердых растворов на основе γ -Ni₃Al фаз [17], образовавшихся в ходе эвтектической реакции из первичных γ -дендритов и в ходе перитектической реакции с участием γ -твердого раствора. Выявлено, что размер структурных составляющих эвтектики не превышает 10–15 мкм, при этом в металле отсутствуют крупные частицы упрочняющих фаз.

Установлено, что на поверхности образца сплава 10X4H76M3B3Ю11PЦ, изношенной газоабразивным потоком при температуре 1000 °С, располагаются лунки размером 30–80 мкм, сформировавшиеся в результате многократного воздействия абразивных частиц. С использованием ионного травления поверхности металла на глубину до 30 мкм получены поперечные сечения лунок, анализ которых показал, что в результате высокоскоростного соударения с абразивной частицей металл подвергается пластической деформации с образованием микрожужки (рис. 5). Причем степень деформации, достаточная для проскальзывания и поворота микрообъемов кристаллов, достигается в тонком поверхностном слое металла толщиной до 2,5 мкм, что проявляется в появлении характерной полосчатой структуры – полос сброса. Исследование сечений поверхностного слоя на обратной стороне испытанного образца не выявило наличия подобной структуры. Это подтверждает, что она не является следствием шлифовальной обработки образцов в процессе их подготовки к испытаниям, а формируется в процессе изнашивания.

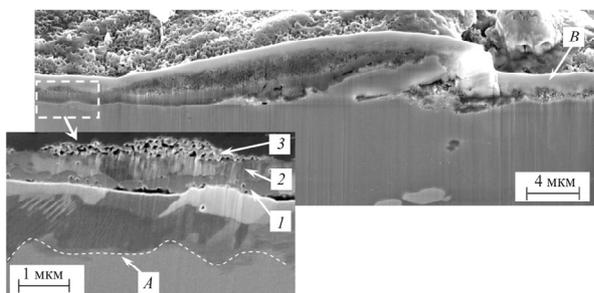


Рис. 5. Сечение поверхностного слоя образца наплавленного металла 10X4H76M3B3Ю11PЦ после испытания на газоабразивное изнашивание при температуре 1000 °С: А – граница зоны интенсивной пластической деформации; В – напыленный слой платины; 1–3 – оксидные слои

Таким образом, небольшая глубина внедрения абразивных частиц в поверхность металла при малых углах атаки газоабразивного потока обуславливает определенные требования к структуре сплава на основе алюминид никеля. Первостепенное значение приобретает твердорастворный, а также интерметаллидный механизм упрочнения металла ультрадисперсными твердыми фазами, равномерно распределенными в микрообъемах твердого раствора. Этому способствует легирование сплава частицами ZrB₂. Так, цирконий, образовавшийся вследствие диссоциации частиц ZrB₂, легирует твердый раствор, повышая его высокотемпературную прочность, а также, наряду с W и Mo, способствует формированию субмикро- и наноразмерных (50–100 нм) интерметаллидных фаз, армирующих твердый раствор. Бор равномерно распределяется по структуре металла без образования легкоплавких боридных эвтектик по границам зерен, что предотвращает их разрушение в процессе высокотемпературных нагревов.

Установлено, что поверхность металла в процессе испытания вследствие высокотемпературного взаимодействия с кислородом воздуха подвергается окислительному изнашиванию. При этом формируются гетерогенные слои оксидов толщиной от 0,5 до 2 мкм: первый – прилегающий к поверхности металла слой оксида Al₂O₃; второй – слой оксидов на основе Fe_xO_y; третий – наружный пенообразный слой комплексных оксидов Fe, Al, Ni, Cr. Наличие на поверхности образца значительного количества оксидов железа обусловлено легированием наплавленного металла ~10 мас. % железа, перешедшего в сварочную ванну из стальной основы. Ударное воздействие абразивных частиц приводит к перемешиванию оксидных слоев и отделению их с поверхности металла в виде «чешуек», что свидетельствует о сложном окислительно-абразивном характере износа наплавленного металла 10X4H76M3B3Ю11PЦ.

Вместе с тем кратковременность цикла экспресс-испытаний позволяет свести к минимуму влияние процессов окисления неизнашиваемых поверхностей образца на изменение его массы в процессе испытания. Например, при испытании стали AISI 316Ti в пределах рекомендованного для ее эксплуатации температурного диапазона (до 700 °С) прирост массы образца вследствие окисления составляет менее 1 % от измеренной потери его массы. Таким образом, предварительное нанесение на образцы для испытаний защитных жаростойких покрытий не требуется.

Выводы

1. Разработанная установка и методика высокотемпературной экспресс-диагностики наплавленных сплавов за счет применения отдельной схемы нагрева образца и газоабразивного потока, а также использования абразива с различным компонентным и гранулометрическим составом, скорость которого варьируется в широком диапазоне, позволяют максимально приблизить условия испытаний к реальным условиям работы различных деталей машин и оборудования.

2. Износ сплава 10X4H76M3B3Ю11РЦ при температуре 1000 °С носит комплексный окислительно-абразивный характер. Сопротивлению металла пластической деформации при ударном воздействии абразивных частиц способствует твердорастворное упрочнение сплава, а также его армирование ультрадисперсными интерметаллидными фазами, формирующимися при его легировании тугоплавкими химическими элементами.

Список литературы

1. Быстров В.А. Условия эксплуатации и высокотемпературного износа засыпного устройства доменной печи // Инжиниринг в черной металлургии. – 2013. – № 10. – С. 35–39.
2. Коротков В.А., Агафонов Э.Ж., Веснин А.М. Восстановление и упрочнение роторов эксгаустеров наплавкой // Горное оборудование и электромеханика. – 2014. – № 7. – С. 24–27.
3. Воробьев В.В., Малинов В.Л. Сплавы и материалы для наплавки контактных поверхностей уравнительных клапанов // Научный вестник донбасской государственной машиностроительной академии. – 2010. – № 2. – С. 64–68.
4. Шумилов А.А., Штанько П.К., Гордиенко В.Н. Разработка наплавочных материалов для повышения износостойкости деталей тягодутьевых машин тепловых электростанций // Вестник СевНТУ. – 2010. – № 110. – С. 216–218.
5. Суховая Е.В. Структура и свойства эвтектических сплавов-связок на железной основе для композиционных покрытий // Материаловедение. – 2006. – № 7. – С. 235–238.
6. Особенности формирования структуры и свойств наплавленных сплавов под влиянием наночастиц тугоплавких соединений / Г.Н. Соколов, И.В. Зорин, А.А. Артемьев [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 2014. – № 2. – С. 38–47.
7. Влияние ультрадисперсных частиц нитрида титана TiN на структуру наплавленного металла системы Fe–Cr–C–Mo–Ni–Ti–V / А.А. Антонов, А.А. Артемьев, Г.Н. Соколов, И.В. Зорин, Ю.Н. Дубцов // Изв. ВолгГТУ. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении: межвуз. сб. науч. ст. – 2015. – Вып. 8, № 8(16). – С. 138–140.
8. Артемьев А.А., Соколов Г.Н., Лысак В.И. Влияние микрочастиц диборида титана и наночастиц карбо-

нитрида титана на структуру и свойства наплавленного металла // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2011. – № 12. – С. 32–37.

9. Жудра А.П. Исследование износостойкости композиционных сплавов в условиях газоабразивного износа при повышенных температурах // Автоматическая сварка. – 2014. – № 11. – С. 31–34.

10. Юзвенко Ю.А., Гавриш В.А. Установка для оценки износостойкости наплавленного металла при газо-абразивной эрозии // Автоматическая сварка. – 1972. – № 6. – С. 73–74.

11. High temperature erosion wear of flame and plasma-sprayed nickel–chromium coatings under simulated coal-fired boiler atmospheres / V. Higuera Hidalgo [et al.] // Wear. – 2001. – No. 247. – P. 214–222.

12. Manish R., Ray K.K., Sundararajan G. Erosion-oxidation interaction in Ni and Ni–20Cr alloy // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2001. – No. 32A. – P. 431–451.

13. Методика испытаний наплавленных сплавов на стойкость к высокотемпературному абразивному изнашиванию / А.А. Артемьев, А.А. Антонов, Г.Н. Соколов, В.И. Лысак // Трение и износ. – 2017. – Т. 38, № 3. – С. 247–254.

14. Установка для испытания материалов на абразивное изнашивание: пат. 2564827 Рос. Федерация, МПК G 01 N 3/56 / Антонов А.А., Артемьев А.А., Соколов Г.Н., Лысак В.И.; ВолгГТУ. – 2015.

15. Диагностика износостойкости наплавленного металла методом склерометрии / Г.Н. Соколов, А.А. Артемьев, И.В. Зорин [и др.] // Сварка и диагностика. – 2012. – № 2. – С. 34–39.

16. Склерометр: пат. 87018 Рос. Федерация, МПК G 01 N 3/46 / Соколов Г.Н., Литвиненко-Арьков В.Б., Зорин И.В., Лысак В.И.; ВолгГТУ. – 2009.

17. Piercing mandrel strengthening by surfacing with nickel aluminide-based alloy / I.V. Zorin, Yu.N. Dubtsov, G.N. Sokolov, A.A. Artem'ev, V.I. Lysak, S.N. Elsukov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. conference 1: International Conference of Mechanical Engineering. Automation and Control Systems 2016 (MEACS 2016) (Tomsk, 27–29 October 2016). – Bristol, UK: IOP Publishing, 2017. – Vol. 177. – p. 4.

References

1. Bystrov V.A. Usloviia ekspluatatsii i vysokotemperaturnogo iznosa zasypnogo ustroistva domennoi pechi [Operating conditions and high-temperature wear of the blast furnace backfill device]. *Inzhiniring v chernoi metallurgii*, 2013, no. 10, pp. 35–39.
2. Korotkov V.A., Agafonov E.Zh., Vesnin A.M. Vosstanovlenie i uprochnenie rotorov eksgausterov naplavkoi [Rehabilitation and hardening of exhauster rotors with cladding]. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*, 2014, no. 7, pp. 24–27.
3. Vorob'ev V.V., Malinov V.L. Splavy i materialy dlia naplavki kontaknykh poverkhnostei uravnitel'nykh klapanov [Alloys and materials for cladding the contact surfaces of balance valves]. *Nauchnyi vestnik donbasskoï gosudarstvennoï mashinostroitel'noi akademii*, 2010, no. 2, pp. 64–68.

4. Shumilov A.A., Shtan'ko P.K., Gordienko V.N. Razrabotka naplavochnykh materialov dlia povysheniia iznosostoikosti detalei tiagodut'evykh mashin teplovykh elektrostantsii [Development of cladding materials to increase wear resistance of parts of heavy-duty machines of thermal power plants]. *Vestnik Sevastopol'skogo Natsional'nogo Tekhnicheskogo Universiteta*, 2010, no. 110, pp. 216–218.
5. Sukhovaia E.V. Struktura i svoistva evtecticheskikh spлавov-sviazok na zheleznoi osnove dlia kompozitsionnykh pokrytii [Structure and properties of ferrous-based eutectic binder alloys for composite coatings]. *Materialovedenie*, 2006, no. 7, pp. 235–238.
6. Sokolov G.N., Zorin I.V., Artem'ev A.A. et al. Osobennosti formirovaniia struktury i svoistv naplavlennykh spлавov pod vlianiem nanochastits tugoplavkikh soedinenii [Features of structure formation and properties of clad alloys under the influence of nanoparticles of refractory fusion compounds]. *Fizika i khimiia obrabotki materialov*, 2014, no. 2, pp. 38–47.
7. Antonov A.A., Artem'ev A.A., Sokolov G.N., Zorin I.V., Dubtsov Iu.N. Vliianie ul'tradispersnykh chastits nitrida titana TiN na strukturu naplavlennogo metalla sistemy Fe–Cr–C–Mo–Ni–Ti–B [Influence of ultradisperse particles of titanium nitride TiN on the welded metal structure of the Fe–Cr–C–Mo–Ni–Ti–B system]. *Izvestiia Volgogradskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Problemy materialovedeniia, svarki i prochnosti v mashinostroenii: mezhvuzovskii sbornik nauchnykh statei*, 2015, iss. 8, no. 8(16), pp. 138–140.
8. Artem'ev A.A., Sokolov G.N., Lysak V.I. Vliianie mikrochastits diborida titana i nanochastits karbonitrida titana na strukturu i svoistva naplavlennogo metalla [Influence of titanium diboride microparticles and titanium carbonitride nanoparticles on the structure and properties of the welded metal]. *Metallovedenie i termicheskaiia obrabotka metallov*, 2011, no. 12, pp. 32–37.
9. Zhudra A.P. Issledovanie iznosostoikosti kompozitsionnykh spлавov v usloviakh gazoabrazivnogo iznosa pri povyshennykh temperaturakh [Investigation of composite alloys wear resistance under conditions of gas-abrasive wear at elevated temperatures]. *Avtomaticheskaiia svarka*, 2014, no. 11, pp. 31–34.
10. Iuzvenko Iu.A., Gavrish V.A. Ustanovka dlia otsenki iznosostoikosti naplavlennogo metalla pri gazoabrazivnoi erozii [Installation for estimation of wear resistance of clad metal at gas-abrasive erosion]. *Avtomaticheskaiia svarka*, 1972, no. 6, pp. 73–74.
11. Higuera Hidalgo V. et al. High temperature erosion wear of flame and plasma-sprayed nickel–chromium coatings under simulated coal-fired boiler atmospheres. *Wear*, 2001, no. 247, pp. 214–222.
12. Manish R., Ray K.K., Sundararajan G. Erosion-oxidation interaction in Ni and Ni–20Cr alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A.*, 2001, no. 32A, pp. 431–451.
13. Artem'ev A.A., Antonov A.A., Sokolov G.N., Lysak V.I. Metodika ispytaniia naplavlennykh spлавov na stoikost' k vysokotemperaturnomu abrazivnomu iznashivaniiu [Methods of testing clad alloys for resistance to high temperature abrasion]. *Trenie i iznos*, 2017, vol. 38, no. 3, pp. 247–254.
14. Antonov A.A., Artem'ev A.A., Sokolov G.N., Lysak V.I. Ustanovka dlia ispytaniia materialov na abrazivnoe iznashivanie [Abrasive Wear Material Test Setting]. Patent Rossiiskaia Federatsiia, no. 2564827 (2015).
15. Sokolov G.N., Artem'ev A.A., Zorin I.V. et al. Diagnostika iznosostoikosti naplavlennogo me-talla metodom sklerometrii [Diagnostics of wear resistance of clad metal by sclerometric method]. *Svarka i diagnostika*, 2012, no. 2, pp. 34–39.
16. Sokolov G.N., Litvinenko-Ar'kov V.B., Zorin I.V., Lysak V.I. Sklerometr [Sclerometer]. Patent Rossiiskaia Federatsiia, no. 87018 (2009).
17. Zorin I.V., Dubtsov Yu.N., Sokolov G.N., Artem'ev A.A., Lysak V.I., Elsukov S.N. Piercing mandrel strengthening by surfacing with nickel aluminide-based alloy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Conference 1: International Conference of Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2016 (MEACS 2016) (Tomsk, 27–29 October 2016)*. Bristol, UK: IOP Publishing, 2017, vol. 177, pp. 4.

Получено 18.11.18

Опубликовано 21.03.19

Сведения об авторах

Артемьев Александр Алексеевич (Волгоград, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры оборудования и технологии сварочного производства Волгоградского государственного технического университета; e-mail: Artspace5@yandex.ru.ru.

Зорин Илья Васильевич (Волгоград, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры оборудования и технологии сварочного производства Волгоградского государственного технического университета; e-mail: zorin.iv@vstu.ru.

Соколов Геннадий Николаевич (Волгоград, Россия) – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры оборудования и технологии сварочного производства Волгоградского государственного технического университета; e-mail: gnsokolov@yandex.ru.

Лысак Владимир Ильич (Волгоград, Россия) – академик РАН, доктор технических наук, заведующий кафедрой оборудования и технологии сварочного производства Волгоградского государственного технического университета; e-mail: gnsokolov@yandex.ru.

Денисевич Денис Сергеевич (Волгоград, Россия) – аспирант кафедры сопротивления материалов Волгоградского государственного технического университета; e-mail: adven148@yandex.ru.

Прияткин Дмитрий Вячеславович (Волгоград, Россия) – аспирант кафедры оборудования и технологии сварочного производства Волгоградского государственного технического университета; e-mail: dmitry.priyatkin@mail.ru.

About the authors

Alexander A. Artem'ev (Volgograd, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Welding Equipment and Technology, Volgograd State Technical University; e-mail: Artspace5@yandex.ru.ru.

Ilya V. Zorin (Volgograd, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Welding Equipment and Technology, Volgograd State Technical University; e-mail: zorin.iv@vstu.ru.

Gennady N. Sokolov (Volgograd, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Welding Equipment and Technology, Volgograd State Technical University; e-mail: gnsokolov@yandex.ru.

Vladimir I. Lysak (Volgograd, Russian Federation) – Academician of Russian Academy of Sciences, Doctor of

Technical Sciences, Head of Department of Welding Equipment and Technology, Volgograd State Technical University; e-mail: gnsokolov@yandex.ru.

Denis S. Denisevich (Volgograd, Russian Federation) – Graduate Student, Department of Welding Equipment and Technology, Volgograd State Technical University; e-mail: adven148@yandex.ru.

Dmitrij V. Priyatkin (Volgograd, Russian Federation) – Graduate Student, Department of Welding Equipment and Technology, Volgograd State Technical University; e-mail: dmitry.priyatkin@mail.ru.