



УДК 621.791.927.5 + 620.178.165

<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-5-44-54>

Научная статья  
Research article



## Формирование износостойких покрытий в процессе электродуговой наплавки с ультразвуковыми колебаниями

Д. В. Прияткин <sup>✉</sup>, А. А. Артемьев, В. И. Лысак

Волгоградский государственный технический университет  
Россия, 400005, г. Волгоград, пр. им. В.И. Ленина, 28

✉ [priyatkin.dv@mail.ru](mailto:priyatkin.dv@mail.ru)

**Аннотация.** Исследование посвящено изучению влияния ультразвуковых колебаний, вводимых в кристаллизующийся металл сварочной ванны через присадочную проволоку в процессе автоматической электродуговой наплавки порошковой проволокой, на особенности формирования износостойкого покрытия из сплава 280X14Г6Н6МЗТ2Б2. Выявлено влияние ультразвуковых колебаний на структурно-фазовый состав и твердость наплавленного покрытия, а также его износостойкость при нормальной и повышенной до 600 °С температурах в условиях воздействия газообразного потока. Изучен характер разрушения тонких поверхностных слоев изношенных покрытий. Установлено, что микроструктура покрытия состоит из карбидной эвтектики на основе аустенита, обладающего повышенной пластичностью и достаточно высокой прочностью за счет легирования хромом и молибденом, что способствует надежному закреплению в нем упрочняющих фаз, представленных карбидами  $\text{Mo}_2\text{C}$ ,  $(\text{Ti}, \text{Nb}, \text{Mo})_x\text{C}_y$  и  $\text{Me}_x\text{C}_y$ . Показано, что под действием высокочастотных акустических колебаний в структуре сплава исчезают крупные первичные карбиды  $\text{Me}_x\text{C}_y$ , на 25 % увеличивается объемная доля аустенита при снижении доли карбидов типа  $\text{Me}_x\text{C}_y$ , а также наблюдается перераспределение легирующих элементов между аустенитом и карбидной фазой. Установлено, что формирование тонкопластинчатой эвтектики обуславливает изменения в механизме изнашивания сплава: прослойки твердого раствора демпфируют сдвиговые деформации при ударах абразивных частиц, а пластическое течение аустенитной матрицы формирует вокруг образующихся обломков карбидов металлическую связку, снижая вероятность их выкрашивания. Это способствует повышению на 18 % стойкости сплава к высокотемпературному газообразному изнашиванию, которая превосходит показатель зарубежного промышленного аналога.

**Ключевые слова:** износостойкие покрытия, карбиды, аустенит, электродуговая наплавка, ультразвуковые колебания, присадочная проволока, высокотемпературное газообразное изнашивание

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-13-00354, <https://rscf.ru/project/23-13-00354>.

**Для цитирования:** Прияткин Д.В., Артемьев А.А., Лысак В.И. Формирование износостойких покрытий в процессе электродуговой наплавки с ультразвуковыми колебаниями. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия.* 2024;18(5):44–54. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-5-44-54>

# Formation of wear-resistant coatings during electric arc surfacing with ultrasonic vibrations

D. V. Priyatkin , A. A. Artem'ev, V. I. Lysak

Volgograd State Technical University  
28 Lenin Prosp., Volgograd 400005, Russia

 priyatkin.dv@mail.ru

**Abstract.** The study focuses on investigating the influence of ultrasonic vibrations introduced into the crystallizing metal of the weld pool through filler wire during automated electric arc surfacing with flux-cored wire, on the formation characteristics of a wear-resistant coating made from the 280Cr14Mn6Ni6Mo3Ti2Nb2 alloy. The effect of ultrasonic vibrations on the structural-phase composition, hardness, and wear resistance of the surfaced coating is analyzed, particularly under normal and elevated temperatures up to 600 °C in conditions of exposure to a gas-abrasive flow. The failure pattern of the thin surface layers of the worn coatings is also studied. It was established that the microstructure of the coating consists of a carbide eutectic based on austenite, which possesses increased ductility and sufficiently high strength due to alloying with chromium and molybdenum. This ensures reliable retention of reinforcing phases represented by  $Mo_2C$ ,  $(Ti, Nb, Mo)_x C_y$ , and  $Me_x C_y$  carbides. It is shown that under the influence of high-frequency acoustic vibrations, large primary  $Me_x C_y$  carbides disappear from the alloy structure, the volume fraction of austenite increases by 25 %, and the proportion of  $Me_x C_y$ -type carbides decreases. Additionally, a redistribution of alloying elements between the austenite and carbide phases is observed. The formation of a fine lamellar eutectic leads to changes in the wear mechanism of the alloy: hard solution layers dampen shear deformations caused by impacts of abrasive particles, while the plastic flow of the austenitic matrix forms a metallic binder around the broken carbide fragments, reducing the likelihood of their detachment. This results in an 18 % increase in the alloy's resistance to high-temperature gas-abrasive wear, surpassing the performance of an international industrial counterpart.

**Keywords:** wear-resistant coatings, carbides, austenite, electric arc surfacing, ultrasonic vibrations, filler wire, high-temperature gas-abrasive wear

**Acknowledgements:** This research was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 23-13-00354, <https://rscf.ru/project/23-13-00354>.

**For citation:** Priyatkin D.V., Artem'ev A.A., Lysak V.I. Formation of wear-resistant coatings during electric arc surfacing with ultrasonic vibrations. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2024;18(5):44–54. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-5-44-54>

## Введение

Промышленное оборудование при эксплуатации подвергается абразивному изнашиванию, резко снижающему его ресурс за счет изменения размеров, формы и состояния рабочих поверхностей деталей [1; 2]. Так, например, детали промышленных вентиляторов, тягодутьевых машин, твердотопливных котлов, газотурбинных установок подвергаются воздействию абразивных частиц, переносимых высокоскоростным потоком нагретых газов. Необходимость замены изношенных деталей обуславливает значительные экономические потери из-за длительных простоев оборудования при проведении ремонтных работ [2–4]. Повысить срок службы деталей рационально путем упрочнения их поверхности износостойкими сплавами [4; 5].

Одним из основных кинематических параметров, определяющим характер и интенсивность разрушения изнашиваемой поверхности, является угол ее атаки газоабразивным потоком [6; 7]. При малых углах атаки (20–30°) и температурах до 600 °C, характерных для работы тягодутьевых машин, в механизме деструкции поверхности доминирует пластическое отеснение металла, а также его микрорезание, что

обуславливает низкую износостойкость пластичных материалов [8–10]. Более предпочтительны в этих условиях сплавы на основе железа с композиционной структурой, состоящей как из крупных, так и дисперсных твердых карбидов, распределенных в объеме пластичной матрицы [11; 12].

Задача получения на поверхности деталей износостойких покрытий большой толщины наиболее универсально и эффективно решается электродуговой наплавкой порошковой проволокой [1; 13]. Применение порошковой проволоки дает возможность получать покрытия практически любого химического состава, обеспечивающего им требуемые эксплуатационные свойства [14; 15]. При этом динамическое воздействие колебаниями ультразвукового диапазона (от 18 кГц) на кристаллизующиеся в процессе наплавки сплавы – один из известных технологических приемов, позволяющих изменить их структурно-фазовый состав, повысить износостойкость, снизить вероятность образования внутренних дефектов и др. [16–18]. Такие изменения обусловлены образованием в расплаве стоячих волн, характеризующихся наличием чередующихся областей сжатия и разрежения. Генерация в данных областях высоких плотностей энергии проявляется в возникновении

вторичных эффектов (кавитации, акустических потоков, радиационного давления, сил вязкого трения), создающих специфические условия кристаллизации металлического расплава [19; 20]. Данные эффекты способствуют интенсификации физико-химических процессов: дегазации, диффузии, диспергирования структуры металла, коагуляции различных фаз и др. [21; 22].

Из всех известных способов передачи ультразвуковых колебаний (УЗК) кристаллизующемуся расплаву сварочной ванны применение с этой целью присадочной (волноводной) проволоки представляет наибольший практический интерес [23]. В этом случае появляется возможность воздействовать на расплав вблизи фронта кристаллизации, где наблюдается наиболее заметный эффект от акустической обработки. Использование в качестве волновода порошковой проволоки дает возможность легировать, а также армировать и модифицировать наплавленный металл тугоплавкими частицами, при этом УЗК могут способствовать более равномерному их распределению в объеме расплава [24; 25]. Вместе с тем необходимо отметить, что в научно-технических публикациях недостаточно полно раскрыты взаимосвязи влияния УЗК на структуру и свойства наплавленных абразивостойких сплавов.

Цель работы заключается в исследовании влияния УЗК на структурно-фазовый состав и стойкость к газоабразивному изнашиванию при температурах до 600 °С покрытия из опытного сплава 280X14Г6Н6МЗТ2Б2, наплавленного электродуговым способом.

## Применяемые материалы и методы исследования

При формировании износостойкого покрытия электродуговой наплавкой в защитном газе в качестве электродной использовали экспериментальную порошковую проволоку (ПП) диаметром 2,8 мм. В качестве оболочки ПП применяли ленту из стали 08кп толщиной 0,25 мм, а наполнителем проволоки служили металлические порошки хрома, никеля, молибдена, ниобия, титана, железа, а также порошок графита. Компонентный состав наполнителя рассчитывали исходя из условия получения в наплавленном сплаве эвтектической структуры с вязкой и пластичной аустенитной матрицей, стабилизированной углеродом, никелем и марганцем, способной надежно удерживать твердые фазы в виде карбидов хрома, титана, ниобия и молибдена [26].

На поверхности пластин из стали СтЗсп в один слой толщиной 6–7 мм формировали износостойкое покрытие, химический состав которого был следующий, мас. %:

C . . . . .	2,7–2,9	Mo . . . . .	3,0–3,14
Cr . . . . .	13,5–15,0	Nb . . . . .	2,0–2,1
Ni . . . . .	5,7–6,0	Ti . . . . .	2,0–2,15
Mn . . . . .	6,0–6,2	Fe . . . . .	основа

Для защиты расплавленного металла от атмосферного воздуха использовали газообразный аргон. Для сравнения износостойкости экспериментального покрытия с показателями промышленных аналогов изготавливали способом электродуговой наплавки покрытиями электродами Weartrode 65T (ESAB) образцы из сплава 600X23Б7М7С2В2Ф.

В качестве присадочной (волноводной) проволоки применяли порошковую проволоку диаметром 2 мм, изготовленную с оболочкой из стальной ленты толщиной 0,5 мм и наполнителем в виде железного порошка.

Химический состав наплавленного покрытия определяли с использованием оптико-эмиссионного спектрометра «Oxford Instruments PMI-MASTER PRO». Металлографические исследования проводили с помощью оптической (микроскоп «Carl Zeiss Axiovert 40 MAT») и электронной (растровый электронно-ионный микроскоп «FEI Versa 3D») микроскопии. Шлифы для металлографических исследований подготавливали на шлифовальном станке «MP-1B Time Group Inc.».

Для выполнения микрорентгеноспектрального анализа структурных составляющих покрытия и построения карт распределения легирующих элементов по поверхности микрошлифов применяли энергодисперсионный рентгеновский детектор «Apollo X-SDD», установленный на микроскопе «Versa 3D». Определение объемных долей структурных составляющих покрытия выполняли путем совместного анализа в программе «Image J» карт распределения химических элементов по поверхности микрошлифов путем вычисления занимаемой ими площади.

Рентгенофазовый анализ наплавленных покрытий проводили на рентгеновском дифрактометре «Bruker D8 Advance Eco» с вертикальным  $\theta$ - $\theta$  гониометром. Съемку исследуемых образцов выполняли в излучении медного анода ( $\lambda = 1,54060 \text{ \AA}$ ) при следующем режиме: напряжение на рентгеновской трубке – 40 кВ; ток накала – 25 мА; время экспозиции – 1 с; шаг сканирования –  $0,02^\circ$ . Идентификацию фаз в покрытиях осуществляли с использованием программного обеспечения Diffrac.EVA, снабженного лицензионной базой данных «Powder Diffraction File-2» (The International Center for Diffraction Data).

ДюрOMETрические испытания наплавленного покрытия производили по методу Роквелла (шкала С) с использованием твердомера «ТН-500 Time Group Inc.».

Сопротивление наплавленного покрытия газоабразивному изнашиванию при нормальной и повы-

шенной до 600 °С температурах оценивали по методике экспресс-испытаний, изложенной в работе [27]. Образец покрытия, представляющий собой пластину размером 40×16×3,5 мм, нагревали проходящим током и воздействовали на него струей разогретого сжатого воздуха, смешанного с абразивными частицами кварцевого песка со средним размером 260 мкм. Стабильность температурного режима испытаний обеспечивали контролем температуры образца с помощью термодатчика ВР5/20, подключенной к аналого-цифровому преобразователю ЛА-20 USB, обеспечивающему вывод показаний на экран персонального компьютера посредством программного обеспечения «PowerGraph». Параметры испытаний были следующие: время испытаний – 120 с, давление воздуха в системе – 3 атм, угол атаки поверхности образца газоабразивным потоком – 30°.

В качестве критерия износостойкости использовали величину удельного износа ( $\xi$ , г/кг), определяемую по формуле

$$\xi = \Delta m / \Delta m_a,$$

где  $\Delta m$  – потеря массы испытанного образца, г;  $m_a$  – масса затраченного в процессе испытания абразива,

кг. Потерю массы образцов измеряли с точностью до 0,0001 г на аналитических весах «Shinko Denshi VIBRA HT-124RC».

Изучение характера пластической деформации тонких поверхностных слоев изношенных покрытий выполняли с помощью электронно-ионного микроскопа путем изготовления методом ионного травления микросечений поверхности с предварительным нанесением на нее слоя платины.

## Техника формирования наплавленных покрытий

Электродугую наплавку покрытия (рис. 1) экспериментальной ПП выполняли с использованием сварочного автомата «A2 Mini Master» (ESAB), снабженного устройством для ввода УЗК в сварочную ванну посредством волноводной проволоки.

В электронейтральной волноводной проволоке, которая постоянно погружена в сварочную ванну и подается в нее с постоянной скоростью, генерируются изгибные колебания частотой 20,6 кГц с помощью совершающего продольные колебания ультразвукового пьезоэлектрического преобразователя. Расплавление проволоки происходит как за счет

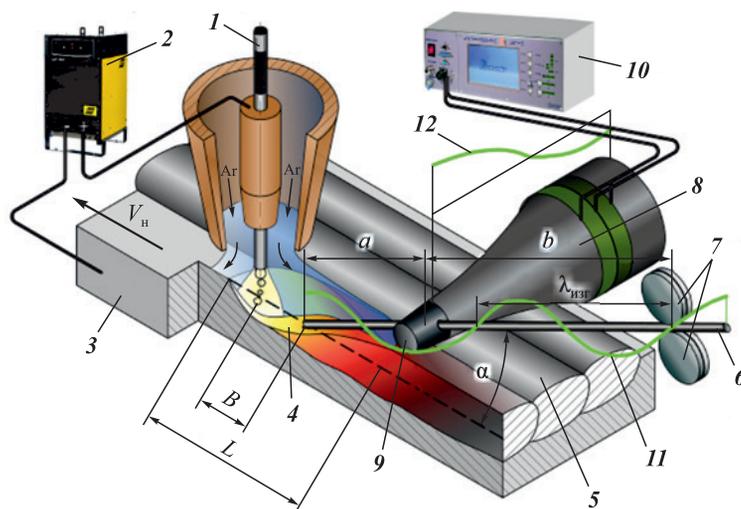


Рис. 1. Принципиальная схема формирования наплавленного покрытия с воздействием УЗК

- 1 – электродная проволока; 2 – сварочный источник тока; 3 – наплавляемая пластина; 4 – сварочная ванна; 5 – наплавленное покрытие; 6 – волноводная проволока; 7 – ролики подающего механизма; 8 – ультразвуковой преобразователь; 9 – узел передачи колебаний волноводной проволоке; 10 – ультразвуковой генератор; 11, 12 – распределение амплитуды изгибных и продольных колебаний соответственно;  $\lambda_{изг}$  – длина изгибной волны;  $B$  – расстояние между волноводной и электродной проволоками;  $a$  – вылет волноводной проволоки;  $b$  – расстояние от места подвода УЗК до роликов подающего механизма;  $\alpha$  – угол наклона волноводной проволоки;  $L$  – длина сварочной ванны;  $V_{н}$  – скорость наплавки

Fig. 1. Schematic diagram of the formation of the surfaced coating with the influence of USV

- 1 – electrode wire; 2 – welding power source; 3 – plate to be surfaced; 4 – weld pool; 5 – surfaced coating; 6 – waveguide wire; 7 – rollers of the feeding mechanism; 8 – ultrasonic transducer; 9 – vibration transmission node to the waveguide wire; 10 – ultrasonic generator; 11, 12 – distribution of the amplitude of bending and longitudinal vibrations, respectively;  $\lambda_{изг}$  – bending wavelength;  $B$  – distance between the waveguide and electrode wires;  $a$  – extension of the waveguide wire;  $b$  – distance from the point of USV input to the feeding mechanism rollers;  $\alpha$  – inclination angle of the waveguide wire;  $L$  – length of the weld pool;  $V_{н}$  – surfacing speed

### Технологические параметры режима наплавки

#### Surfacing process parameters

Сварочный ток $I_{св}$ , А	Напряжение на дуге $U_d$ , В	Скорость наплавки $V_n$ , м/ч	Расстояние между проволоками $B$ , мм	Скорость подачи волноводной проволоки $V_{пд}$ , м/ч	Угол ввода волноводной проволоки $\alpha$ , град	Частота УЗК $f$ , кГц	Амплитуда УЗК $\zeta$ , мкм	Расход защитного газа (Ar), л/мин
290–330	25–26	14–15	17	28–29	30	20,6	11	14–16

тепла, выделяющегося в реакционной зоне сварки, так и благодаря теплу, генерируемому в самой проволоке при прохождении через нее УЗК [28]. Для достижения максимальной амплитуды колебаний конца волноводной проволоки в сварочной ванне ее вылет ( $a$ ) должен быть кратен половине длины изгибных волн ( $\lambda_{изг}$ ), а ролики подающего механизма должны контактировать с проволокой в узле колебаний на расстоянии  $b$  от торца преобразователя (рис. 1). Это способствует снижению потерь энергии колебаний в процессе наплавки, так как система получается акустически замкнутой.

Источником питания ультразвукового преобразователя служил ультразвуковой генератор УЗГ 4-2 компании «Ультра-резонанс» (г. Екатеринбург). Электрическая мощность, потребляемая преобразователем в процессе наплавки, составляла 200 Вт. Контроль амплитуды и частоты акустических колебаний осуществляли способом бесконтактной лазерной виброметрии с использованием вибromетра «Polytec VibroFlex Neo».

Наплавку выполняли на стальные пластины размером  $200 \times 150 \times 12$  мм с перекрытием валиков, равным 30 % от их ширины. Для предотвращения образования трещин в наплавленном покрытии производили предварительный подогрев пластин до температуры  $300 \pm 20$  °С и обеспечивали их замедленное охлаждение после наплавки. Температуру перед наплавкой контролировали инфракрасным пирометром ТЕХНОАС С-20.4.

Источником сварочного тока (ток постоянный, «+» на электроде) служил тиристорный выпрямитель ESAB LAF 1001. Технологические и акустические параметры режима наплавки (см. таблицу) подбирали экспериментально, исходя из задачи получения хорошо сформированного, бездефектного наплавленного покрытия при минимальной величине проплавления основного металла. Основные параметры режима наплавки покрытий с воздействием ультразвуковых колебаний и без них не отличались.

Расстояние ( $B$ ) между электродной и присадочной проволоками, зависящее от длины сварочной ванны ( $L$ ), – один из наиболее важных технологических параметров данного процесса, от которого зависит качество формирования наплавленного покрытия,

равномерность расплавления присадочной проволоки и стабильность ультразвуковой обработки сварочной ванны. При использовании волноводной ПП диаметром 2 мм и скорости ее подачи в сварочную ванну 28–29 м/ч расстояние  $B$  должно находиться в диапазоне 0,37–0,57 от длины ванны  $L$  [28]. При введении проволоки в ванну за верхней границей данного диапазона наблюдаются дефекты формирования наплавленного покрытия, а при ее подаче в непосредственной близости к электрической дуге ультразвуковая обработка невозможна, поскольку волноводная проволока расплавляется над сварочной ванной.

Введение проволоки в сварочную ванну под углом 30° к наплавляемой поверхности позволяет обеспечить полное ее расплавление в широком диапазоне скоростей подачи.

### Результаты и их обсуждение

Экспериментально установлено, что воздействие УЗК при наплавке покрытия из сплава 280X14Г6Н6М3Т2Б2 приводит к значительным структурным изменениям в нем (рис. 2). Микроструктура покрытия, сформированного без акустического воздействия на кристаллизующийся сплав – заэвтектическая с крупными первичными карбидами иглообразной и пластинчатой формы (рис. 2, *a, б*). Совместный микрорентгеноспектральный и рентгенофазовый анализ покрытий показал, что твердый раствор карбидной эвтектики состоит из легированного  $\gamma$ -Fe, а основная часть упрочняющей фазы представлена карбидами типа  $Me_7C_3$  и  $Me_3C_2$ , где Me – хром, железо, марганец и молибден (рис. 3). В структуре также присутствуют относительно равномерно распределенные по объему дисперсные твердые фазы, представленные комплексными карбидами  $(Ti, Nb, Mo)_x C_y$  и монокарбидами  $Mo_2C$  со средним размером частиц 3,5 мкм и 1,6 мкм соответственно. Дефектов типа трещин, отслоений от основного металла, пор и т.д. в наплавленном покрытии не обнаружено.

Воздействие высокочастотных акустических колебаний приводит к исчезновению в структуре покрытия крупных кристаллов первичных карбидов  $Me_x C_y$

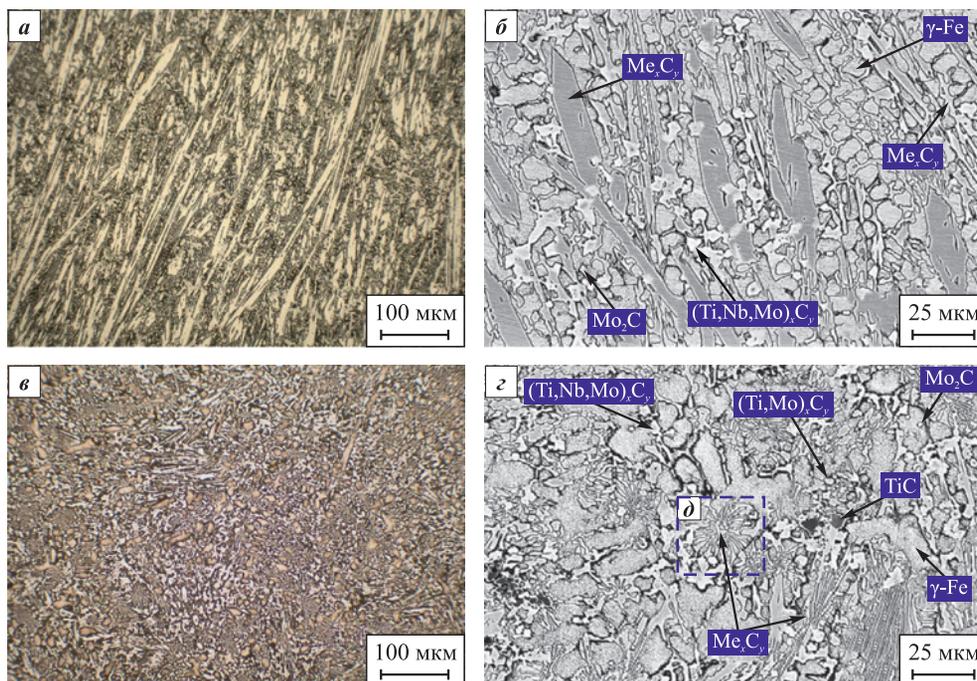


Рис. 2. Микроструктура покрытия, наплавленного без УЗК (а, б) и с воздействием УЗК (в, г)  
 а, в – оптическое изображение; б, г – электронное изображение; δ – «розетка» карбида  $Me_xC_y$

Fig. 2. Microstructure of the coating surfaced without USV (a, б) and with USV (в, г):  
 а, в – optical image; б, г – electron image; δ – “rosette” of  $Me_xC_y$  carbide

и некоторому диспергированию аустенитно-карбидной эвтектики (рис. 2, в, г), что сопровождается появлением характерных «розеток», состоящих из пластинчатых карбидов, разделенных прослойками твердого раствора. Помимо карбидов  $(Ti,Nb,Mo)_x C_y$

и  $Mo_2C$  в сплаве появляется небольшое количество карбидов  $(Ti, Mo)_x C_y$  и  $TiC$ .

Установлено, что высокочастотные колебания присадочной проволоки обуславливают ее дополнительный подогрев. Это способствует снижению эффекта «захлаживания» сварочной ванны, проявляющегося в классических процессах наплавки с «холодной» присадкой в уменьшении ее длины. В исследуемом процессе при скорости подачи проволоки 28–29 м/ч длина ванны уменьшается на величину не более 4 %. При этом доля присадочного металла в наплавленном очень мала и составляет 1,0–1,2 мас. %. Таким образом, изменения в структуре исследуемого сплава связаны именно с воздействием на процесс его кристаллизации акустических колебаний, а не с переохлаждением расплава сварочной ванны или изменением его химического состава.

Механизм трансформации микроструктуры наплавленного покрытия под воздействием УЗК заключается в следующем. В отсутствие акустического воздействия из расплава сварочной ванны кристаллизуются крупные первичные карбиды  $Me_x C_y$ , между которыми формируется аустенитно-карбидная эвтектика. При возбуждении в расплаве высокочастотных акустических колебаний процесс кристаллизации происходит в условиях механического воздействия ударных волн, образующихся при возникновении в расплаве кавитации, которые разрушают расту-

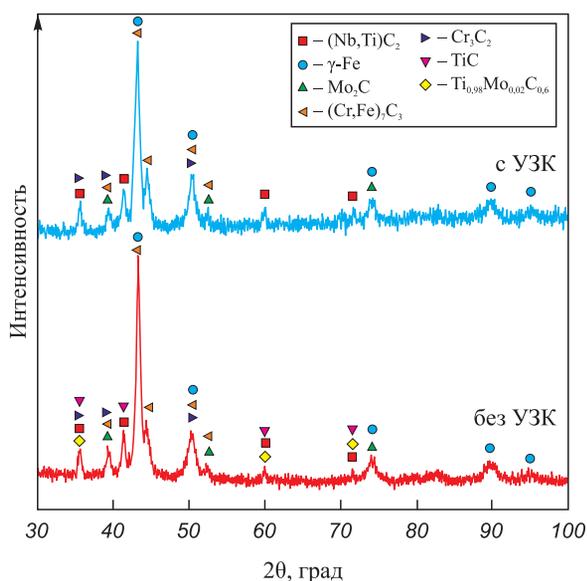
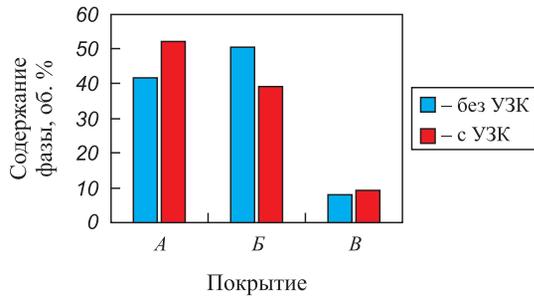


Рис. 3. Результаты рентгенофазового анализа покрытий, наплавленных с воздействием УЗК и без них

Fig. 3. Results of X-ray phase analysis of coatings surfaced with and without USV



**Рис. 4.** Количественное распределение фаз в структуре покрытия, наплавленного с воздействием УЗК и без него  
А – аустенит, Б – карбиды типа  $Me_xC_y$ ,  
В – карбиды типа  $(Ti,Nb,Mo)_x C_y$ ,  $(Ti, Mo)_x C_y$ ,  $Mo_2C$  и TiC

**Fig. 4.** Volume fraction of structural components in the surfaced alloy with and without USV

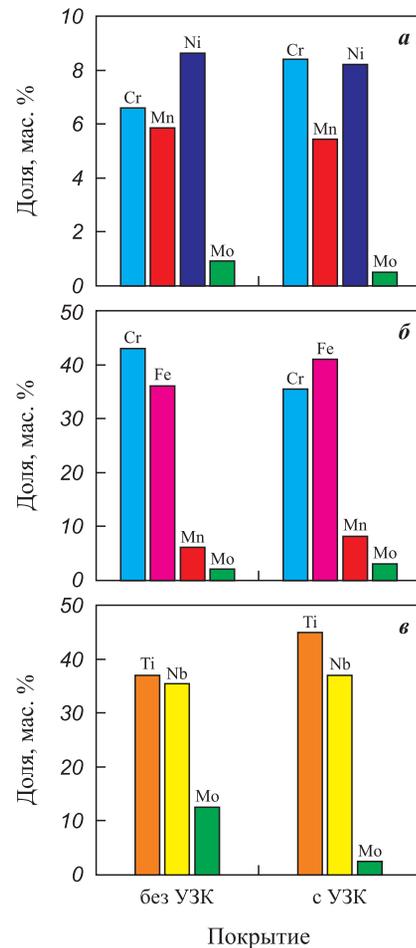
А – austenite, Б –  $Me_xC_y$ , carbides,  
В –  $(Ti,Nb,Mo)_x C_y$ ,  $(Ti, Mo)_x C_y$ ,  $Mo_2C$ , and TiC carbides

щие кристаллы карбидов. Формирующиеся обломки карбидов переносятся акустическими потоками по фронту кристаллизации и служат дополнительными центрами кристаллизации. Зарождению упрочняющих фаз на этих обломках в расплаве может способствовать пониженное под воздействием УЗК поверхностное натяжение на межфазных границах.

Изменение кинетики кристаллизации наплавленного сплава под воздействием акустической обработки приводит к росту на 25 % объемной доли аустенита (рис. 4), при этом содержание карбидов  $Me_xC_y$  пропорционально снижается, а содержание дисперсных карбидов  $(Ti,Nb,Mo)_x C_y$  и  $Mo_2C$  изменяется незначительно.

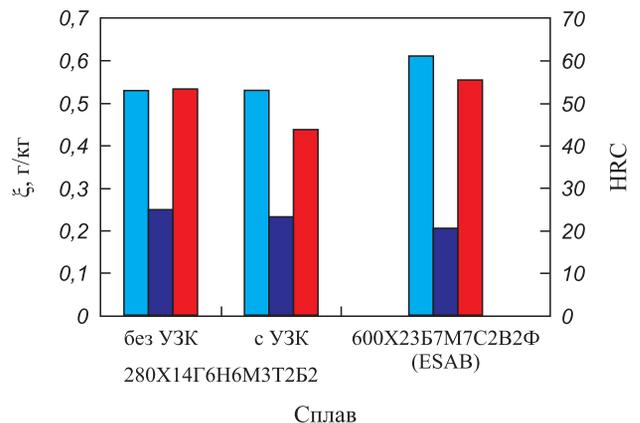
Изменение объемной доли структурных составляющих в наплавленном сплаве сопровождается перераспределением между ними легирующих элементов (рис. 5), что влияет на их механические свойства. Установлено, что содержание молибдена в аустените снижается в 2 раза, а содержание хрома, наоборот, увеличивается на 20 %, что может способствовать повышению жаропрочности матрицы сплава. Это сопровождается пропорциональным падением доли хрома в карбидах  $Me_xC_y$  и ростом содержания в них железа, марганца и молибдена, что может снижать их микротвердость. Содержание молибдена в карбидах  $(Ti,Nb,Mo)_x C_y$  сокращается практически в 5 раз, а соотношение в них Ti/Nb (в ат. %) увеличивается с 1,05 до 1,2, что, согласно [29], может способствовать повышению микротвердости данных карбидов.

Установлено, что структурные изменения в наплавленном покрытии, происходящие под воздействием УЗК, не оказывают влияния на его твердость, но обуславливают повышение в среднем на 18 % его стойкости к высокотемпературному газоабразивному изнашиванию (рис. 6). При этом износостойкость



**Рис. 5.** Химический состав аустенита (а), карбидов  $Me_xC_y$  (б) и  $(Ti,Nb,Mo)_x C_y$  (в) в покрытии, наплавленном с УЗК и без них

**Fig. 5.** Chemical composition of austenite (a),  $Me_xC_y$  carbides (b), and  $(Ti,Nb,Mo)_x C_y$  (c) in the coating surfaced with and without USV



**Рис. 6.** Твердость (HRC) и удельный износ ( $\xi$ ) экспериментального и промышленного сплавов  
■ – твердость HRC; ■ –  $\xi$  при 20 °С; ■ –  $\xi$  при 600 °С

**Fig. 6.** Hardness (HRC) and specific wear ( $\xi$ ) of the experimental and industrial alloys

■ – HRC hardness; ■ –  $\xi$  at 20 °C; ■ –  $\xi$  at 600 °C

экспериментального сплава 280X14Г6Н6М3Т2Б2, модифицированного воздействием УЗК, на 26 % превосходит показатель более легированного зарубежного промышленного аналога 600X23Б7М7С2В2Ф (ESAB). Высокая износостойкость разработанного покрытия обусловлена формированием в нем композиционной структуры, сочетающей прочную и пластичную матрицу из никель-марганцовистого аустенита, легированного хромом и молибденом, а также упрочняющую фазу в виде пластинчатых карбидов  $Me_xC_y$  и высокотвердых дисперсных карбидов  $(Ti,Nb,Mo)_x C_y$  и  $Mo_2C$ .

Выявлено (рис. 7), что в результате воздействия высокотемпературного газобразивного потока на

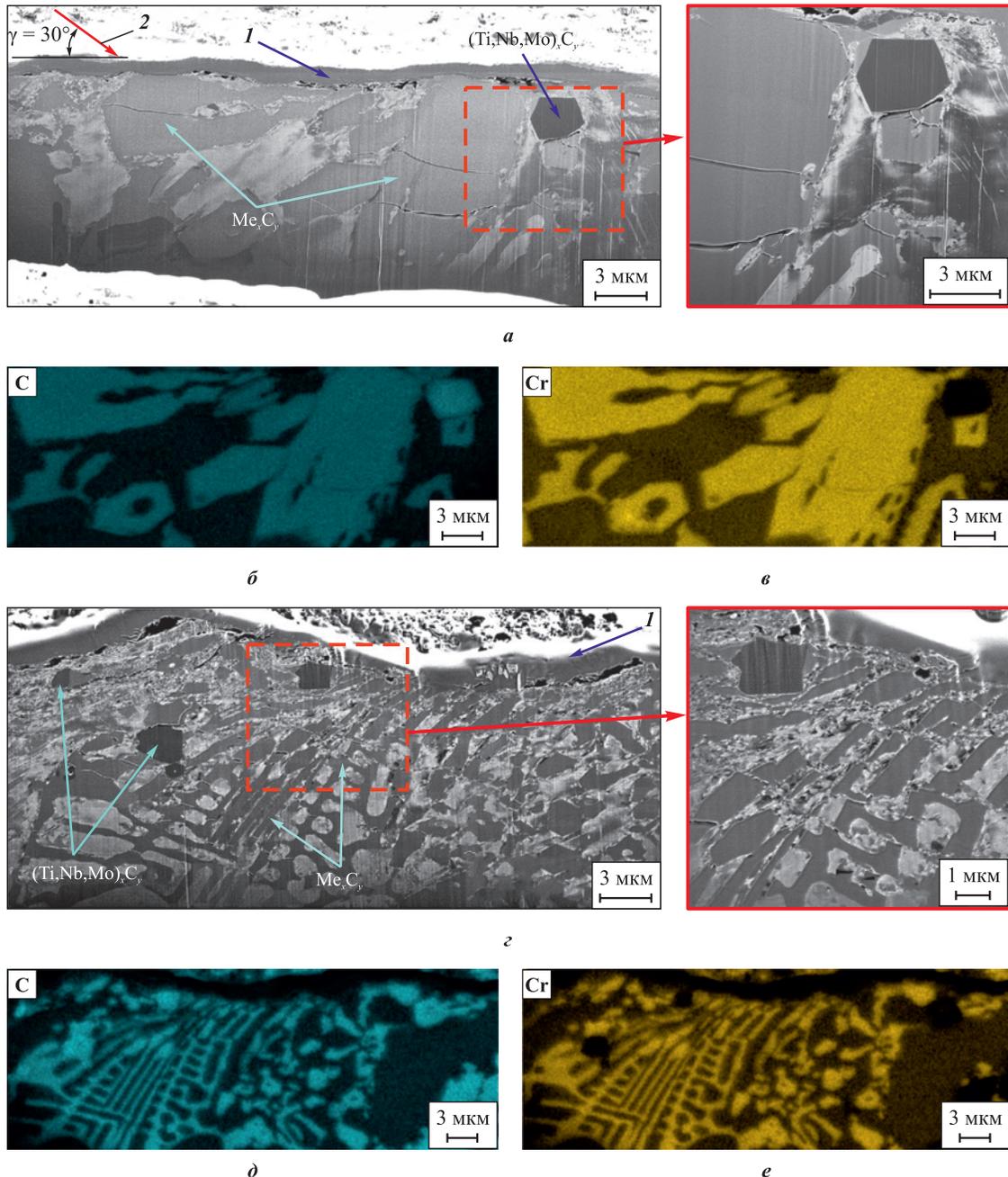


Рис. 7. Сечения поверхностного слоя покрытий, наплавленных без воздействия УЗК (а) и с УЗК (з), после испытаний на газобразивное изнашивание при температуре 600 °С; карты распределения углерода (б, д) и хрома (в, е) по сечению покрытий

1 – слой платины; 2 – направление газобразивного потока

Fig. 7. Cross sections of the surface layer of coatings surfaced without USV (a) and with USV (z), after gas-abrasive wear testing at 600 °C; carbon (б, д) and chromium (в, е) distribution maps across the cross-sections

1 – platinum layer; 2 – direction of the gas-abrasive flow

поверхности покрытий формируется деформированный слой, идентифицируемый на сечениях изношенных образцов, полученных ионным травлением. Под ударами абразивных частиц происходит частичное разрушение крупных пластинчатых карбидов  $Me_xC_y$ , что сопровождается появлением в них трещин, раскрывающихся в направлении воздействия газоабразивного потока (рис. 7, а–в). Мелкие и более прочные карбиды  $(Ti,Nb,Mo)_x C_y$  компактной формы смещаются вместе с матричным материалом без разрушения, ограничивая его пластическую деформацию и снижая скорость изнашивания покрытия. Основным механизмом изнашивания является, по всей видимости, выкрашивание относительно крупных осколков карбидов  $Me_xC_y$  с последующим срезанием микрообъемов аустенита.

Изучение поперечного сечения изношенного покрытия, наплавленного с использованием УЗК, показало (рис. 7, г), что процессы интенсивной пластической деформации в сплаве распространяются на глубину около 10 мкм. Под воздействием абразивных частиц тонкие пластинки карбидов  $Me_xC_y$  растрескиваются, а обломки смещаются в направлении удара. Вместе с тем прослойки твердого раствора демпфируют сдвиговые деформации, а пластическое течение аустенитной матрицы формирует вокруг образующихся обломков карбидов металлическую связку, снижая возможность их выкрашивания. Вероятно, этому также способствует увеличение объема аустенита в структуре модифицированного покрытия, а также повышение его жаропрочности в результате увеличения содержания хрома.

## Выводы

1. Установлено, что ультразвуковая обработка сварочной ванны в процессе электродуговой наплавки влияет на процессы кристаллизации износостойкого покрытия, способствуя уменьшению объемной доли и измельчению первичных и эвтектических карбидов типа  $Me_xC_y$ , увеличению на 25 % объема аустенитной матрицы, а также появлению в структуре карбидов  $(Ti,Mo)_x C_y$  и TiC. Это сопровождается перераспределением легирующих элементов между упрочняющими фазами и аустенитом, что влияет на их механические свойства. Содержание хрома в аустените повышается на 20 %, а в карбидах  $Me_xC_y$  – снижается, при этом концентрации молибдена и марганца в аустените уменьшаются, а в карбидах  $Me_xC_y$ , наоборот, растут. Наряду с этим в карбидах  $(Ti,Nb,Mo)_x C_y$  увеличивается содержание титана, а молибдена – многократно снижается.

2. Структурные изменения в покрытии, протекающие под воздействием УЗК, обуславливают повышение на 18 % его стойкости к газоабразивному изнаши-

ванию при температуре 600 °С, которая превышает показатели зарубежных промышленных аналогов. Это объясняется формированием тонкопластинчатой карбидной эвтектики, упрочненной высокотвердыми карбидами  $(Ti,Nb,Mo)_x C_y$ , которая сдерживает интенсивную пластическую деформацию сплава в процессе изнашивания, ограничивая ее глубиной 10 мкм. При этом негативный эффект от растрескивания карбидов  $Me_xC_y$  под ударами абразивных частиц нивелируется увеличением объема и жаропрочности аустенита, пластическое течение которого образует вокруг обломков карбидов металлическую связку, снижающую вероятность их выкрашивания.

## Список литературы / References

1. Соколов Г.Н., Лысак В.И. Наплавка износостойких сплавов на пресовые штампы и инструмент для горячего деформирования сталей. Волгоград: Политехник, 2005. 284 с.
2. Pawar S., Jha A.K., Mukhopadhyay G. Effect of different carbides on the wear resistance of Fe-based hardfacing alloys. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2019;78:288–295. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2018.10.014>
3. Jindal C., Sidhu B.S., Kumar P., Sidhu H.S. Performance of hardfaced/heat treated materials under solid particle erosion: A systematic literature review. *Materials Today: Proceedings*. 2022;50(5):629–639. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.441>
4. Kleis I., Kulu P. Solid particle erosion: occurrence, prediction and control. London: Springer, 2008. 206 p. <https://doi.org/10.1016/10.1007/978-1-84800-029-2>
5. Fortini A., Suman A., Zanini N. An experimental and numerical study of the solid particle erosion damage in an industrial cement large-sized fan. *Engineering Failure Analysis*. 2023;146:107058. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107058>
6. Roy M. Elevated temperature erosive wear of metallic materials. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2006;39(6): 101–124. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/39/6/R01>
7. Ricardo G.A.N., Sommerfeld M. Comprehensive Euler/Lagrange modelling including particle erosion for confined gas-solid flows. *Particology*. 2024; 84:209–235. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2023.06.010>
8. Zhou L., Li T., Liu Z., Ma H., Xu C., Dong Y., Zhao Y. An impact energy erosion model with an energy allocation rule for the discrete element method. *Wear*. 2024;540–541: 205233. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.205233>
9. Tarodiya R., Levy A. Surface erosion due to particle-surface interactions – A review. *Powder Technology*. 2021;387:527–559. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.04.055>
10. Крунич Б., Тарасюк В., Барсуков В.Г., Свириденко А.И. Экспериментальная оценка влияния механических свойств контактирующих материалов на газоабразивное изнашивание сталей в системах пескоструйного типа. *Трение и износ*. 2020;41(1):5–11.

- Krupicz B., Tarasiuk W., Barsukov V.G., Sviridenok A.I. Experimental evaluation of the influence of mechanical properties of contacting materials on gas abrasive wear of steels in sandblasting systems. *Journal of Friction and Wear*. 2020; 41(1):5–11.  
<https://doi.org/10.3103/S1068366620010110>
11. Varga M. High temperature abrasive wear of metallic materials. *Wear*. 2017; 376–377(A):443–451.  
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.12.042>
  12. Прияткин Д.В., Артемьев А.А., Лысак В.И., Лойко П.В. Анализ наплавочных сплавов для работы в условиях газоабразивного изнашивания при повышенных температурах. *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2020;10(245):49–55.  
<https://doi.org/10.35211/1990-5297-2020-10-245-49-55>  
 Priyatkin D.V., Artem'ev A.A., Lysak V.I., Loiko P.V. Analysis of hardfacing alloys for work in conditions of gas-abrasive wear at elevated temperatures. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2020; 10(245):49–55. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.35211/1990-5297-2020-10-245-49-55>
  13. Qin Z., He D., Ma L., He C., Wu X., Wang, G. Influence of Ni additions on microstructure, non-magnetic properties, and wear resistance of Fe–Mn–Cr alloy deposited by metal-cored arc welding. *Welding in the World*. 2024; 68:699–714. <https://doi.org/10.1007/s40194-024-01694-9>
  14. Чернышов Г.Г., Коберник Н.В., Орлик А.Г., Чернышова Т.А. Влияние структуры наплавочных покрытий на стойкость к абразивному износу. *Физика и химия обработки материалов*. 2011;(5):44–50.  
 Chernyshov G.G., Kobernik N.V., Orlik A.G., Chernyshova T.A. The influence of the structure of the deposited coatings on the resistance to abrasive wear. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. 2011;(5):44–50. (In Russ.).
  15. Еремин Е.Н., Лосев А.С., Бородин С.А., Маталасова А.Е., Пономарев И.А. Порошковая проволока для наплавки коррозионно-стойкой и износостойкой стали. *Вестник машиностроения*. 2018;(7):66–68.  
 Eremin E.N., Losev A.S., Borodikhin S.A., Matalasova A.E., Ponomarev I.A. Powder wire for surfacing corrosion-resistant and wear-resistant steel. *Vestnik mashinostroeniya*. 2018;(7):66–68. (In Russ.).
  16. Сараев Ю.Н., Лебедев В.А., Новиков С.В. Анализ существующих методов управления структурой металла сварного шва. *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. 2016;4(1):16–26.  
 Saraev Yu.N., Lebedev V.A., Novikov S.V. Analysis of existing methods for controlling the structure of the weld metal. *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*. 2016;4(1):16–26. (In Russ.).
  17. Fan Z., Bai K., Chen C. The application of ultrasound in Joining: Principles, processes and properties. *Journal of Manufacturing Processes*. 2023;101:269–299.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.05.094>
  18. Mohsan A.U.H., Zhang M., Wang D., Zhao S., Wang Y., Chen C., Zhang J. State-of-the-art review on the Ultrasonic Vibration Assisted Laser Cladding (UVALC). *Journal of Manufacturing Processes*. 2023;107:422–446.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.10.066>
  19. Zhang K., Gao G., Zhao C., Wang Y., Wang Y., Li, J. Review of the design of power ultrasonic generator for piezoelectric transducer. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2023;96:106438.  
<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106438>
  20. Chang L., Yanpeng Y., Zhaotai L., Xin H., Tenghui J. Differential analysis of the influence mechanism of ultrasonic vibrations on laser cladding. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2022;38:16–37.  
<https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.03.009>
  21. Кудина А.В., Кураш В.В., Редин И.В., Хроленок В.В. Получение износостойких металлопокрытий электродуговой наплавкой плавящимся электродом при воздействии на него ультразвуком. *Агропанорама*. 2013;3(97):34–38.  
 Kudina A.V., Kurash V.V., Redin I.V., Khrolenok V.V. Obtaining wear-resistant metal coatings by electric arc surfacing with a melting electrode when exposed to ultrasound. *Agropanorama*. 2013;3(97):34–38. (In Russ.).
  22. Минин С.И., Трофимов А.И., Трофимов М.А. Технология термической сварки циркуляционных трубопроводов АЭС с воздействием ультразвука. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2016;(4):5–11.  
<https://doi.org/10.26583/npe.2016.4.01>  
 Minin S.I., Trofimov A.I., Trofimov M.A. The technology of thermal welding of the circulation piping of NPPS containing the influence of ultrasound. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2016;(4):5–11. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.26583/npe.2016.4.01>
  23. Прияткин Д.В., Артемьев А.А., Соколов Г.Н., Лысак В.И., Одногулов Р.М., Лойко П.В. Анализ способов введения в сварочную ванну ультразвуковых колебаний в процессе дуговой наплавки и разработка устройства для его осуществления. *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2019;4(227):68–75.  
 Priyatkin D.V., Artem'ev A.A., Sokolov G.N., Lysak V.I., Odnogulov R.M., Loiko P.V. Analysis of the methods of introducing the ultrasonic vibrations in the weld pool in the process of arc surface and development devices for its implementation. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2019;4(227):68–75. (In Russ.).
  24. Wang Y., Yu C., Lu H., Chen J. Research status and future perspectives on ultrasonic arc welding technique. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020;58:936–954.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.09.005>
  25. Fattahi M., Ghaheri A., Arabian N., Amirkhanlu F., Moayedi H. Applying the ultrasonic vibration during TIG welding as a promising approach for the development of nanoparticle dispersion strengthened aluminum weldments. *Journal of Materials Processing Technology*. 2020;282:116672.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116672>
  26. Прияткин Д.В., Артемьев А.А., Лысак В.И. Исследование наплавочного металла системы Fe–Cr–Ni–Mn–Mo–Ti–Nb–C для работы в условиях высокотемпературного газоабразивного изнашивания. *Вопросы материаловедения*. 2022;3(111):17–28.  
<https://doi.org/10.22349/1994-6716-2022-111-3-17-28>

Priyatkin D.V., Artemyev A.A., Lysak V.I. Investigation of the surfaced metal of the Fe–Cr–Ni–Mn–Mo–Ti–Nb–C system for operation under high-temperature gas-abrasive wear. *Voprosy Materialovedeniya*. 2022;3(111):17–28. (In Russ.).

<https://doi.org/10.22349/1994-6716-2022-111-3-17-28>

27. Артемьев А.А., Соколов Г.Н., Зорин И.В., Лысак В.И., Рыков М.А., Крутенко А.В., Шнипко М.В. Методика испытаний наплавленного металла на газоабразивное изнашивание. *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2018;3(213):112–116.

Artem'ev A.A., Sokolov G.N., Zorin I.V., Lysak V.I., Rykov M.A., Krutenko A.V., Shnipko M.V. Method of tested weld metal for gas-abrasive wearing. *Izvestiya Vol-*

*gogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2018;3(213):112–116. (In Russ.).

28. Прияткин Д.В., Артемьев А.А., Лысак В.И., Цыганок С.Н. Электродуговая наплавка износостойких сплавов с ультразвуковым воздействием на сварочную ванну. *Сварка и диагностика*. 2023;(5):20–26.

Priyatkin D.V., Artemyev A.A., Lysak V.I., Tsyganok S.N. Electric arc cladding of wear-resistant alloys with ultrasonic action on the weld pool. *Svarka i diagnostika*. 2023;(5):20–26. (In Russ.).

29. Sun S., Fu H., Ping X., Guo X., Lin J., Lei Y., Zhou J. Formation mechanism and mechanical properties of titanium-doped NbC reinforced Ni-based composite coatings. *Applied Surface Science*. 2019;476:914–927.

<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.01.171>

### Сведения об авторах



### Information about the Authors

**Дмитрий Вячеславович Прияткин** – к.т.н., ст. преподаватель кафедры «Оборудование и технология сварочного производства» Волгоградского государственного технического университета (ВолгГТУ)

ORCID: 0000-0003-0001-8019

E-mail: priyatkin.dv@mail.ru

**Александр Алексеевич Артемьев** – к.т.н., доцент кафедры «Оборудование и технология сварочного производства» ВолгГТУ

ORCID: 0000-0001-6616-0427

E-mail: artspace7@ya.ru

**Владимир Ильич Лысак** – д.т.н., профессор, академик РАН, заведующий кафедрой «Оборудование и технология сварочного производства», научный руководитель ВолгГТУ

ORCID: 0000-0003-3066-058X

E-mail: lysak@vstu.ru

**Dmitriy V. Priyatkin** – Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer, Department of Equipment and Welding Production, Volgograd State Technical University (VSTU)

ORCID: 0000-0003-0001-8019

E-mail: priyatkin.dv@mail.ru

**Aleksandr A. Artem'ev** – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Equipment and Welding Production, VSTU

ORCID: 0000-0001-6616-0427

E-mail: artspace7@ya.ru

**Vladimir I. Lysak** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Head of the Department of Equipment and Welding Production, Scientific Director, VSTU

ORCID: 0000-0003-3066-058X

E-mail: lysak@vstu.ru

### Вклад авторов



### Contribution of the Authors

**Д. В. Прияткин** – изготовление порошковых проволок для наплавки, эксперименты по электродуговой наплавке покрытий с воздействием ультразвуковых колебаний, дюрометрические испытания, металлографические исследования.

**А. А. Артемьев** – проведение испытаний образцов на газоабразивное изнашивание, изучение механизмов изнашивания покрытий, анализ изменений химического и структурно-фазового состава покрытий под воздействием ультразвуковых колебаний.

**В. И. Лысак** – определение целей и задач исследования, анализ полученных результатов, научное редактирование статьи.

**D. V. Priyatkin** – responsible for the production of powder wires for surfacing, conducting experiments on electric arc surfacing of coatings with ultrasonic vibrations, durometric testing, and metallographic studies.

**A. A. Artem'ev** – conducted tests on samples for gas-abrasive wear, studied the mechanisms of coating wear, and analyzed changes in the chemical and structural-phase composition of coatings under the influence of ultrasonic vibrations.

**V. I. Lysak** – defined the goals and objectives of the research, analyzed the results obtained, and provided scientific editing of the article.

Статья поступила 31.05.2024 г.

Доработана 01.08.2024 г.

Принята к публикации 12.08.2024 г.

Received 31.05.2024

Revised 01.08.2024

Accepted 12.08.2024