

Международный открытый форум International open forum

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.791.927

doi: 10.30987/2782-5957-2022-6-48-61

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НАПЛАВКИ ПОКРЫТИЙ

Юрий Николаевич Сараев¹, Валерий Павлович Безбородов², Марина Владимировна Перовская³, Вячеслав Максимович Семенчук⁴, Алина Анатольевна Григорьева⁵, Александр Сергеевич Непомнящий^{1, 6}

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия

⁶ Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

¹ litsin@ispms.tsc.ru, ORCID 0000-0002-9457-4309

² val@ispms.tsc.ru, ORCID 0000-0003-4558-7944

³ mv_perovskaya@inbox.ru, IORCID 0000-0003-2780-6023

⁴ svm_70@ispms.tsc.ru, ORCID 0000-0002-7215-0505

⁵ alina@ispms.tsc.ru, ORCID 0000-0001-7782-2000

⁶ asn39@tpu.ru, ORCID 0000-0003-1527-3207

Аннотация

В работе, на основе анализа современных подходов, связанных с формированием высоких характеристик на поверхностях конструкционных сталей, работающих в экстремальных условиях эксплуатации, представлен концептуальный подход к повышению стойкости рабочих поверхностей изделий применением новых материалов и технологий их нанесения, включая различные методы напыления и наплавки.

Цель исследования: поиск путей повышения эксплуатационных показателей быстроизнашивающихся изделий, работающих в условиях экстремальных нагрузок и интенсивного изнашивания, путем применения новых материалов и современных технологий их нанесения, методами напыления и наплавки.

Задача, к решению которой посвящена статья, связана с обоснованием физических принципов инженерии упрочняющих покрытий, на основе применения наиболее эффективных направлений повышения эксплуатационных показателей быстроизнашивающихся изделий в условиях повышенного износа и экстремальных нагрузок.

Методы исследования. На основе аналитического обзора существующих подходов упрочнения быстроизнашивающихся поверхностей, обосновано применение современных методов исследования, включая: высокоскоростную видеосъемку, осциллографирование основных энергетических параметров режима, выполняемое синхронно с записью видео изображений, тепловизионной съемки тепловых полей в процессе экспериментов.

Новизна работы заключается в комплексном применении нового поколения напыляемых и наплавляемых материалов, и перспективных методов их нанесения, включая дополнительную ударно-механическую обработку поверхностных слоев, а также методов регулируемого тепловложения, способствующих управляемой кристаллизации расплава на обрабатываемых поверхностях, применением импульсно-дуговых способов наплавки.

Результаты исследования. На основе выполненных исследований предлагается концептуальный подход создания современных технологий нанесения покрытий, включая наиболее эффективные составы материалов, как известных в практике их эффективного применения, так и новые технологии их нанесения, в том числе и с применением методов адаптивных импульсных технологий наплавки.

Выводы.

Повышения эксплуатационных свойств изделий, работающих в условиях интенсивного износа и коррозии, можно достичь комплексным применением нового поколения наплавочных и напыляемых материалов, технологий их нанесения на рабочие органы быстро изнашивающихся изделий, новых методов наплавки на основе адаптивных импульсных технологий.

Ключевые слова: покрытие, модифицирование, импульс, свойства материала, сплав, наплавка, структура.

Ссылка для цитирования:

Сараев, Ю.Н. Концептуальные основы создания современных технологий наплавки покрытий / Ю. Н. Сараев, В. П. Безбородов, М. В. Перовская, В. М. Семенчук, А. А. Григорьева, А. С. Непомнящий // Транспортное машиностроение. – 2022. - № 6. – С. 48–61 . doi: 10.30987/2782-5957-2022-6-48-61.

Финансирование: статья подготовлена по результатам выполнения государственного задания ИФПМ СО РАН на 2021-2023 годы, проект FWRW-2021-0003

Original article
Open Access Article

CONCEPTUAL FOUNDATIONS FOR DEVELOPING MODERN COATING SURFACING TECHNOLOGIES

Yuri Nikolaevich Saraev¹, Valery Pavlovich Bezborodov², Marina Vladimirovna Perovskaya³, Vyacheslav Maksimovich Semenchuk⁴, Alina Anatolyevna Grigorieva⁵, Aleksander Sergeevich Nepomnyashchy^{1,6}

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Institute of Strength Physics and Materials Science of SB RAS (ISPMS SB RAS), Tomsk, Russia

⁶ Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

¹ litsin@ispms.tsc.ru, ORCID 0000-0002-9457-4309

² val@ispms.tsc.ru, ORCID 0000-0003-4558-7944

³ mv_perovskaya@inbox.ru, ORCID 0000-0003-2780-6023

⁴ svm_70@ispms.tsc.ru, ORCID 0000-0002-7215-0505

⁵ alina@ispms.tsc.ru, ORCID 0000-0001-7782-2000

⁶ asn39@tpu.ru, ORCID 0000-0003-1527-3207

Abstract

The paper presents a conceptual approach to improving the durability of the working surfaces of products using new materials and technologies for their application, including various methods of spraying and surfacing based on the analysis of modern ways of forming high characteristics on the surfaces of structural steels used under extreme operating conditions.

The study objective is to find ways to increase the operational performance of wearing products operating under conditions of extreme loads and intensive wear, through the use of new materials and modern technologies for their application, spraying and surfacing methods.

The problem to which the paper is devoted deals with justifying the physical principles of reinforcing coating engineering on the basis of applying the most effective ways to improve the performance of wearing products in the conditions of increased wear and extreme loads.

Research methods. Based on an analytical review of existing approaches to reinforcing wearing surfaces, the application of modern research methods is justified including: high-speed video recording, oscillography of the main mode energy parameters, performed synchronously with the recording of video images, thermal imaging of thermal fields during experiments.

The novelty of the work is connected with the complex application of a new generation of sprayed and surfaced materials, and promising methods of their application, including additional shock and mechanical treatment of the surface layers, as well as methods of controlled heat deposition, contributing to controlled crystallization of the melt on the treated surfaces, using pulse and arc surfacing methods.

Research results. Based on the research carried out, a conceptual approach is proposed to develop modern coating technologies, including the most effective combinations of materials, both practically known because of their effective application, and new technologies, including methods of adaptive pulse surfacing technologies.

Conclusions.

Improving the operational properties of products used under conditions of intense wear and corrosion can be achieved by the complex application of a new generation of surfacing and sprayed materials, technologies for their application to the working bodies of rapidly wearing products, new methods of surfacing based on adaptive pulse technologies.

Keywords: coating, modification, pulse, material properties, alloy, surfacing, structure.

Reference for citing:

Saraev YuN, Bezborodov VP, Perovskaya MV, Semenchuk VM, Grigorieva AA, Nepomnyashchy AS. Conceptual foundations for developing modern coating surfacing technologies. *Transport Engineering*. 2022;6:48-61. doi: 10.30987/2782-5957-2022-6-48-61.

Введение

Проблема долговечности и надежности машин и механизмов в настоящее время решается за счет повышения свойств поверхностного слоя, толщина которого задается условиями эксплуатации [1-3]. В основе создания материала с заданными свойствами лежат два подхода: 1) изменение химического состава материала и 2) получение необходимой структуры материала. Оба эти подхода определяют применение методов упрочнения поверхности, включая модифицирование слоя материала изделий, как без изменения геометрических размеров, так и за счет нанесения покрытия на поверхность, когда размеры изменяются на величину нанесенного слоя [4-6]. В первом случае изменяется структура материала в поверхностном слое или химический состав, а также распределение элементов по глубине слоя, или то и другое одновременно [7-9]. Во втором случае главным фактором упрочнения является выбранный материал по-

крытия, отличный от основного материала изделия и обеспечивающий необходимые свойства поверхности [10-13]. В настоящее время в производственной практике существует большой выбор упрочняющих технологий, которые в наибольшей степени подходят для условий эксплуатации.

Для правильного выбора метода упрочнения и оптимальных параметров технологического процесса необходимо четко представлять, как реализуется выбранная концепция упрочняющей обработки изделий, прежде всего с позиций возможности её практической реализации [14-17].

Цель работы: поиск путей повышения эксплуатационных показателей быстронашиваемых изделий в условиях экстремальных нагрузок путем создания и применения, современных технологий нанесения защитных и упрочняющих покрытий.

Методология основных направлений решения задач исследований

При проектировании технологии упрочнения для изделия приходится решать задачи со многими неизвестными: выбор материала, выбор метода, выбор оптимальных параметров предварительной подготовки изделия под нанесение покрытия и т.д., что требует больших затрат времени и ресурсов. Задача проектирования технологического процесса упрочнения поверхности и нанесения покрытия состоит из ряда последовательных этапов, в том числе:

– на первом этапе требуется сформулировать техническое задание, которое должно включать в себя характеристику изделия, условия его работы и требования к его поверхности;

– на втором этапе определяются структура и химический состав поверхностного слоя или материала покрытия, способные обеспечить заданные характеристики поверхности изделия;

– на третьем этапе осуществляется выбор оптимального технологического процесса с учетом комплекса факторов, включающих конструктивные, технологические, эксплуатационные и экономические показатели;

– на заключительном этапе задаются оптимальные технологические параметры выбранного процесса, обеспечивающие необходимое качество поверхности упрочняемого изделия.

Подобные задачи являются многофакторными. Их решение сводится к отысканию оптимального варианта нанесения покрытия [18]. Однако, в условиях реального производства, проектирование технологических процессов упрочнения поверхности и нанесения покрытий, по-прежнему основывается на практическом опыте конструкторов, технологов и материаловедов [19, 20].

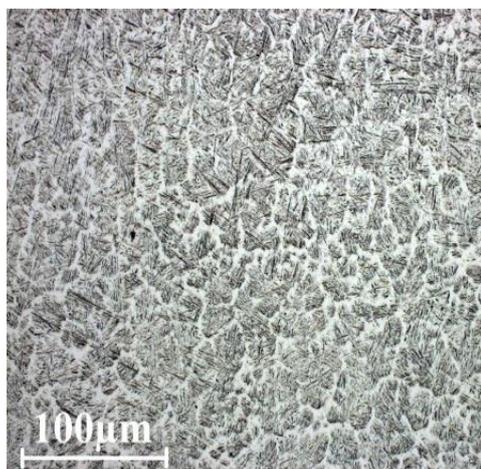
Классификация методов получения покрытий

Покрытие представляет собой поверхностный слой, создаваемый на подложке (стали) и характеризующийся толщиной, а также химическим составом и структурой, качественно отличающимися от характеристик материала основы [21].

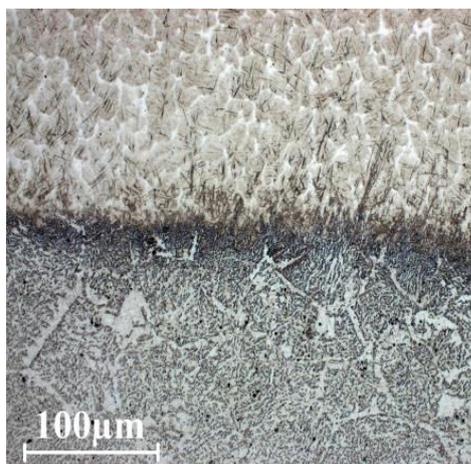
Большой выбор материалов, используемых для создания покрытий, позволяет обеспечить необходимые свойства поверхности, или комплекс свойств, для большой номенклатуры изделий современного машиностроения. Следует отметить, что традиционно применяемые конструкционные материалы, не всегда удовлетворяют требованиям, предъявляемым к изделиям, работающим в экстремальных условиях эксплуатации [22]. При этом конструкционные материалы повышенного качества, если они отвечают таким требованиям, могут оказаться излишне дорогими для использования в массовом производстве. Возникающее затруднение снимается при получении на рабочей поверхности покрытия толщиной от долей миллиметра до нескольких миллиметров, способного обеспечить необходимые эксплуатационные характеристики изделий.

Незначительный расход материала покрытия и высокие характеристики получаемой рабочей поверхности изделия обеспечивают повышенный интерес к разработке методов нанесения покрытий целевого назначения и широкое внедрение покрытий в производственную практику, рис. 1.

Существуют многочисленные способы нанесения покрытий, которые классифицируются с различных позиций [1]: а) по методам получения - механические, химические, электрофизические; б) по виду технологического процесса - гальванические, вакуумные, наплавка; в) по используемым материалам - металлические, керамические, полимерные; г) по виду состояния используемых материалов - нанесение покрытий в твердом дисперсном состоянии, д) нанесение покрытий из жидкой фазы, в том числе эмульсий, суспензий, лаков и т.п., е) нанесение покрытий из электролитических растворов; ж) нанесение покрытий из расплавов; з) нанесение покрытий из газовой фазы или газовых смесей.



а



б

Рис. 1. Микроструктуры композиционного покрытия, наплавленного электродами ЭН-60М – а; б – граница раздела «покрытие - сталь 09Г2С». Увеличение×1000

Fig. 1. Microstructures of composite coating deposited with EN-60M electrodes – a; b – the interface "coating - steel 09G2S". Magnification×1000

Покрyтия подразделяются по назначению: износостойкие, коррозионностойкие, жаростойкие, декоративные и т.д. [1]. Классификация способов нанесения покрyтий проводится с учетом механизмов и явлений, лежащих в основе процессов формирования и образования структуры: напыление; высокоэнергетические технологии; комбинированные методы, наплавка.

Научные основы различных методов нанесения покрyтий изучены в разной степени. Это связано со сложностью каждого физико-химического процесса, со специфическими особенностями методов и уровнем научных исследований для каждого из них. Одной из самых главных характеристик покрyтия, любого назначения, является адгезия - прочность сцепления покрyтия с основой. Современные методы позволяют получать покрyтия с высокими характеристиками жаропрочности, износостойкости, коррозионной стойкости. При этом, если не обеспечить требуемый уровень адгезии, отвечающей условиям эксплуатации данного изделия, то покрyтие не найдет практического применения. Величина адгезии, а значит, и работоспособность деталей с покрyтиями, в значительной степени зависят от состояния их поверхностного слоя перед нанесением покрyтия, поэтому следует учитывать влияние основных параметров поверхностного слоя деталей на качество наносимых покрyтий при выборе технологии подготовки поверхности основы (подложки). Загрязненность этой поверхности затрудняет взаимодействие покрyтия с материалом подложки, способствует возникновению несплошностей в покрyтии и областей с высокими локальными напряжениями. Все это снижает прочность сцепления покрyтия с подложкой и, как следствие, приводит к отслаиванию и растрес-

киванию покрyтия, как в процессе его нанесения, так и при его эксплуатации [23].

Для устранения вышеперечисленных факторов, в процессе газотермического напыления, могут применяться специальные методы, например, ударной механической обработки, способствующие формированию слоистой структуры, характерной для обработки поверхности материала ковкой, либо передачей энергии ударного импульса при волновом деформационном упрочнении [24, 25, 26]. Помимо выше обозначенного подхода, часто применяют дополнительное оплавление поверхности, которое способствует формированию на поверхности литой структуры, часто имеющей с обрабатываемым изделием общую зону сплавления. При этом полностью снимается вопрос адгезии, как одного из основных критериев качества наносимого покрyтия.

Выше перечисленные факторы, влияющие на качественные и прочностные характеристики покрyтий, могут оказывать различную степень влияния на конечный результат. В зависимости от эксплуатационных требований к работающему изделию, могут применяться либо методы нанесения тонких покрyтий, начиная от единиц микрон, и заканчивая долями миллиметров, до единиц или даже десятков миллиметров, когда покрyтие работает как монослой в биметаллическом неразъемном соединении. Реализация второго варианта покрyтий возможно только методами наплавки, при которой можно реализовать применение, как нового поколения присадочных материалов, так и перспективных технологий, и оборудования, обеспечивающих комплексное модифицирующее воздействие на характер протекания микрометаллургических процессов.

Анализ современных способов наплавки покрyтий из металлов и сплавов

Наплавленный металл после затвердевания и охлаждения прочно связывается с основным металлом, образуя покрyтие. Основная цель наплавки - получение рабочей поверхности изделий, деталей машин

и инструментов с повышенными характеристиками, такими, как износостойкость, коррозионностойкость, ударно-абразивная стойкость. В настоящее время в техноло-

гии наплавки существует два основных направления [1]:

- восстановительная наплавка деталей, подвергнутых интенсивному износу;
- изготовительная наплавка для удлинения срока службы деталей.

Восстановление изношенных деталей наплавкой оказывается экономически выгодным ввиду того, что масса наплавленного материала составляет всего лишь 2-4 % от массы восстанавливаемого изделия. Это позволяет возвращать в строй действующих большое количество изделий. В основе технологии наплавки используются методы, обеспечивающие следующие условия:

- неглубокое и равномерное проплавление основного металла;
- образование ровного валика с хорошим внешним видом;
- отсутствие склонности к возникновению дефектов;
- высокая технологичность процесса.

Существуют следующие виды наплавки в зависимости от вида используемой энергии: газовая, дуговая, покрытым электродом, под слоем флюса, открытой дугой, в среде защитного газа, вибродуговая, электрошлаковая, индукционная, плазменная, лазерная, электроннолучевая. Каждая из представленных технологий имеет свои особенности применения, однако, наибольший интерес представляет электродуговая наплавка плавящимся электродом.

Способы наплавки выбираются в зависимости от ведения технологического процесса: ручная, полуавтоматическая, автоматическая. По сравнению с другими способами обработки поверхности изделий, технология наплавки обладает рядом преимуществ и недостатков.

К преимуществам наплавки относятся:

- возможность нанесения покрытия большой толщины за счет практически неограниченного числа наплавленных слоев (от 0,25 до 5,0 мм и выше, электрошлаковая наплавка до 450 мм);

- высокая производительность, достигаемой, например, при использовании ленточных электродов до 15-25 кг/час;

- относительная простота конструкции и транспортабельность оборудования, возможность проводить ремонтные работы в полевых условиях, например, при газопламенной наплавке;

- отсутствие ограничений на размеры ремонтируемых изделий.

Недостатки технологии наплавки связаны с высоким значением погонной энергии, используемой для получения расплавленного состояния наплавленного материала и обрабатываемого материала изделия.

Основные недостатки технологий наплавки:

- ухудшение свойств наплавленного слоя из-за перехода в него элементов основного металла;

- деформация изделия из-за высокого нагрева;

- ограниченный выбор сочетаний основного и наплавленного металлов из-за образования, в ряде случаев, например, при плохой свариваемости, хрупкой прослойки интерметаллидов на границе покрытие – основа;

- трудность наплавки на поверхность мелких изделий сложной формы;

- невозможность наплавки на поверхность тонкостенных деталей.

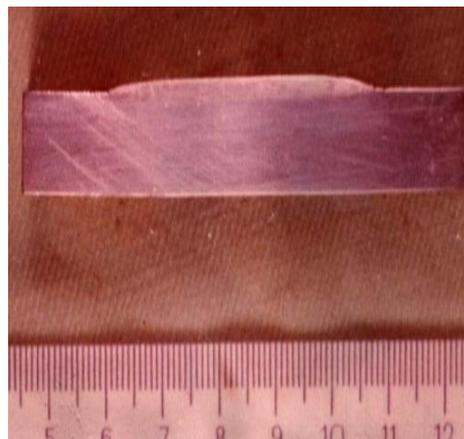
Учитывая указанные достоинства и недостатки, технология наплавки получила широкое применение в ремонтном производстве. На рисунке 2 приведен интерфейс взаимосвязи всех составляющих технологического процесса ремонтно-восстановительной наплавки, используемой для решения задач по продлению срока службы быстро изнашиваемых изделий, включая валы, рычаги, тяги, крестовины, лемеха, лапы культиваторов, а также детали строительных машин: отвалов бульдозеров, зубьев ковшей экскаватора, деталей ходовой части и т.п., рис. 3, 4.



Рис. 2. Интерфейс взаимосвязи всех составляющих технологического процесса ремонтно-восстановительной наплавки
Fig. 2. Interface of interrelation of all components of the technological process of repair and restoration surfacing.



а



б

Рис. 3. Снимки установки плазменно-порошковой наплавки и образца:
 а – установка; б – образец с покрытием.

*Fig. 3. Images of the plasma-powder surfacing installation and sample:
 a – installation; b – coated sample*

Помимо перечисленных, восстановительной наплавке подвергают разнообразные по форме и размерам детали железнодорожного подвижного состава, буровой инструмент, детали горнодобывающего и металлургического оборудования, включая прокатные валки, конуса засыпных аппаратов доменных печей и т.п. Наплавкой получают износостойкие и коррозионно-стойкие покрытия, работающие при повышенных температурах, под нагрузкой, и обеспечивающие механическую проч-

ность, например, при изготовлении сосудов высокого давления, предназначенных для атомной энергетики и химической промышленности.

Таким образом, в отличие от других методов упрочнения, наплавка является наиболее универсальным способом нанесения покрытий и применяется, главным образом, для деталей, работающих в условиях повышенного износа и ударных нагрузок, либо в условиях агрессивной среды при повышенных температурах [27].



а



б

Рис. 4. Снимки установки дуговой наплавки (под флюсом с импульсным управлением энергетическими параметрами режима) и коронок зубьев ковшей экскаваторов фирмы «Каматсу»:
а – установка; б – упрочненные коронки зубьев.

*Fig. 4. Pictures of the arc surfacing installation (submerged with pulse control the energy parameters of the mode) and the crowns of the teeth of the excavators of the Kamatsu company:
a – installation; b – hardened tooth crowns*

В зависимости от технологии наплавки исходный, наплавляемый материал, выбирают в виде проволоки, стержня, электродов с обмазкой, порошка, порошковой проволоки. Для получения необходимых свойств покрытия выбирают материал определенного химического состава. Этот выбор определяется, в первую очередь, материалом восстанавливаемого изделия, а также условиями его эксплуатации. Самым простым результатом выбора являются электроды из углеродистой стали, которые применяются для восстановления изношенных изделий, а также электроды из легированных сталей, содержащих такие легирующие элементы, как Cr, Ni, Mo, Mn и др. Для наплавки изделий, подвергающихся интенсивному изнашиванию, созданы специальные материалы - твердые сплавы.

Традиционно применяемые сплавы [1], условно, можно разделить на три группы:

К первой группе относится релит, являющийся композицией литых карбидов вольфрама и используемый для наплавки быстро изнашивающихся стальных изделий в условиях интенсивного абразивного износа с ударными нагрузками.

Ко второй группе относят стеллиты и сормаиты. Стеллиты - сплавы, содержащие

кобальт и вольфрам, или никель и хром. Стеллиты обладают высокой стойкостью против коррозии. Хорошая свариваемость позволяет использовать их для наплавки на инструменты. Сормаиты – сплавы на железохромовой основе с марганцем и никелем. Они менее твердые и износостойкие, чем стеллиты, но более дешевые, поэтому находят более широкое применение при восстановлении деталей сельскохозяйственной техники.

К третьей группе относится сталинит. Это сплав на железной основе, содержащий Cr, Mn, Si и до 10-20 % углерода. Его применяют для наплавки деталей, подвергающихся интенсивному абразивному износу.

Помимо перечисленных, в последнее время находят все большее применение, получаемые методом СВС, порошковые материалы на основе карбидов титана и бора, нитрида хрома в сочетании с другими легирующими элементами (Ni, V, Mo). Природа упрочнения поверхности для каждого из применяемых материалов имеет свои особенности. При наплавке углеродистой стали упрочнение происходит за счет термических условий формирования поверхностного слоя – при высокой скорости охлаждения получают закалочные структуры с повышенной твердостью.

Свойства поверхности после наплавки легированных сталей зависят от типа легирующих элементов, предопределяющих фазовый состав, границы фазовых переходов, механические свойства.

Твердые сплавы типа релит и стеллит обладают свойствами, определяемыми химическим составом: карбиды вольфрама -

Результаты исследований и их обсуждение

Одним из способов повышения прочностных свойств в быстроизнашивающихся изделиях из сталей и сплавов, является снижение в зонах неразъемных соединений структурной неоднородности, появляющейся в результате повторного расплавления и последующей кристаллизации наносимого покрытия. Как правило, при традиционных методах наплавки, формируется крупнозеренная структура, которая подвержена наиболее частым появлениям в ней, эксплуатационным дефектам, приводящим к ускоренному износу и последующему разрушению. При этом, снижается порог хладноломкости сталей. С учетом отмеченного обстоятельства, необходимо снижение структурной неоднородности, не только за счет снижения в ней размеров структурных составляющих, но существенного снижения размеров самой области, прежде всего зоны термического влияния. Так, например, в работе [28], было установлено, что небольшие добавки бора вызывают существенное измельчение зерен, повышают ее твердость, износостойкость. Легирование стали бором в небольших количествах позволяет снизить необходимость их легирования такими элементами, как хром, никель и молибден, при одновременном сохранении высокого уровня механических и других свойств. В ряде исследований отмечается, что высокую износостойкость можно получить при формировании в покрытии эвтектической структуры, упрочняющей фазой которой могут быть бориды Fe, Ti, Ni, Cr и других металлов [28].

Кроме того, на структуру наплавленного металла, а значит, и на его физико-механические свойства оказывает, помимо количества легирующих элементов, и тех-

в первом случае и сплавы на основе Ni-Cr - во втором случае. Сормайт и сталинит, содержащие высокий процент углерода, образуют твердый износостойкий слой содержащий чугун, в случае сталинита - это легированный белый заэвтектический чугун.

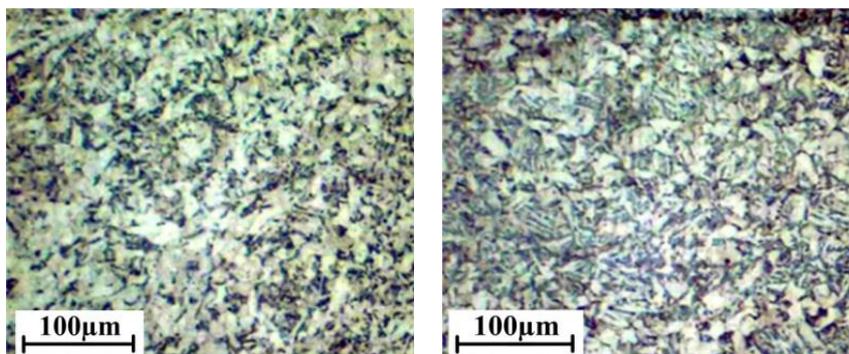
нологические параметры наплавки. При изменении режима наплавки меняются процесс расплавления материала, геометрические характеристики наплавленного слоя, химическая однородность наплавленного металла [29]. Так, на износостойкость и ударную вязкость упрочненных изделий оказывают влияние образование в процессе наплавки боридов, их форма, размеры и относительное расположение в матричном материале.

Наиболее эффективным способом модифицирования наплаваемых покрытий является технологический процесс, при котором в качестве модифицирующих компонентов используются порошковые материалы, состоящие из субмикро- и нанокристаллических тугоплавких соединений - карбидов, нитридов и боридов тугоплавких металлов. Такие порошковые композиции представляют собой многофазные системы. Их применение может приводить к формированию покрытий в виде высокодисперсных композиций, с включениями нанокompозитных упрочняющих фаз, так как размеры метастабильных карбидов, боридов и нитридов составляют десятки нанометров. В процессе наплавки вкрапления таких нанокompозитов в матрицу Fe-C способствуют формированию дисперсноупрочненной структуры, что приводит к повышению механических и эксплуатационных свойств наплавленного металлов.

Однако, несмотря на бесспорную эффективность повышения механических и эксплуатационных свойств наплавленного металла, технологическому процессу наплавки с применением традиционных технологий на постоянном токе, присущи существенные недостатки. Эти недостатки

связаны с наличием в покрытиях большого количества дефектов, прежде всего либо, в виде несплавлений или в виде чрезмерного проплавления и, как следствие, излишнего тепловложения в обрабатываемое изделие.

Отмеченных недостатков можно избежать, если за основу технологического процесса наплавки принимать методы адаптивного импульсного управления его энергетическими параметрами [29, 30, 31], рис. 5, 6.



а

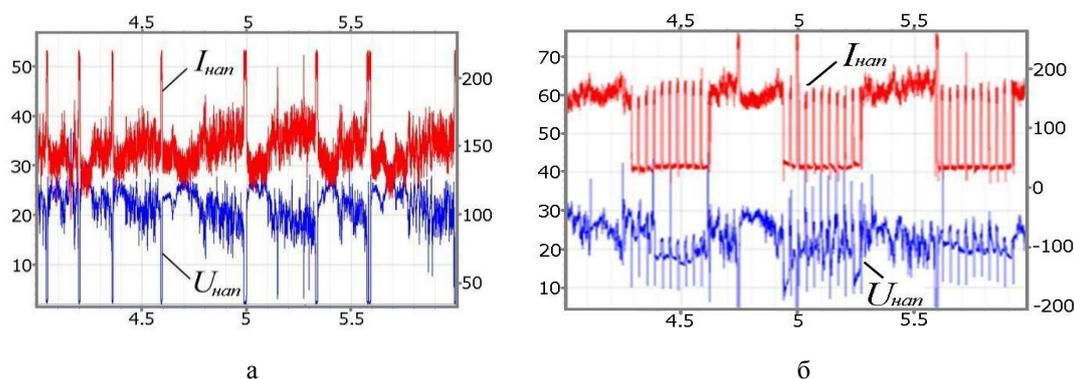
б

Рис. 5. Микроструктурное состояние покрытий, полученных традиционной технологией на постоянном токе – а и адаптивной импульсно-дуговой наплавкой – б, $\times 500$. Основа – сталь 09Г2С

Fig. 5. Microstructural state of coatings obtained by traditional direct current technology -a and adaptive pulse-arc surfacing – b, $\times 500$. The base is steel 09G2S

В этом случае, энергетические параметры импульсного режима наплавки изменяются по законам адаптивного управления, обеспечивая периодическое изменение газодинамического давления источника нагрева на расплав ванны. Это приводит к активному перемешиванию расплава и более равномерному распределению

легирующих элементов по всему объему наплавляемого металла. Кроме того, периодизация энергетических параметров режима наплавки способствует обеспечению регулируемого тепловложения в обрабатываемое изделие, что в конечном итоге, повышает эксплуатационные показатели формируемых покрытий.



а

б

Рис. 6. Характерные осциллограммы тока и напряжения при наплавке электродами с покрытием: а – режим наплавки на постоянном токе, б – режим наплавки с модуляцией тока; I_{surf} – ток наплавки, А, U_{surf} – напряжение наплавки, В; по оси абсцисс – время регистрации в секундах, по оси ординат – ток и напряжение наплавки.

Fig. 6. Characteristic oscillograms of current and voltage during surfacing with coated electrodes: a – direct current surfacing mode, b- current modulated surfacing mode; I_{surf} – surfacing current, A, U_{surf} – surfacing voltage, V; on the abscissa Axis – the registration time in seconds, on the ordinate axis - the current and voltage of the surfacing.

Выводы

1. Повышения эксплуатационных свойств изделий, работающих в условиях интенсивного износа и коррозии, можно достичь комплексным применением нового поколения наплавочных и напыляемых материалов, технологий их нанесения на рабочие органы быстро изнашивающихся изделий, новых методов наплавки на основе адаптивных импульсных технологий.

2. Использование наплавочных материалов, в составе которых применяются специально подготовленные лигатуры, модифицированные дисперсными тугоплавкими соединениями, может открыть новые

перспективы для совершенствования методов получения покрытий с оптимальным комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств наплавленного металла.

3. Применение адаптивных импульсных технологических процессов наплавки способствует повышению качественных прочностных характеристик формируемых покрытий, что в сочетании с использованием новых наплавочных материалов, позволяет обеспечить стабильность эксплуатационной надежности ответственных изделий с упрочняющими покрытиями.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Хасуи А., Моригаки О. Наплавка и напыление // Перевод с японского В.Н. Попова; под редакцией В.С. Степина, Н.Г. Шестеркина. - М.: Машиностроение, 1985. 240 с.
2. Дудко Д.Л., Сидорук В.С., Тягун-Белоус Г.С. Пути снижения тепловложения в свариваемый металл при электрошлаковой сварке толсто-стенных конструкций // Автоматическая сварка. 1982. № 10. С. 48-50.
3. Сабуров В.П. Упрочняющее модифицирование стали и сплавов // Литейное производство. 1998. № 9. С. 7-8.
4. Еремин Е.Н. Применение наночастиц тугоплавких соединений для повышения качества сварных соединений из жаропрочных сплавов // Омский научный вестник. 2009. № 3. С. 63-67.
5. Keskitalo M., Mäntyjärvi K., Sundqvist J., Powell J., Kaplan A.F.H. Laser welding of duplex stainless steel with nitrogen as shielding gas // Journal of Materials Processing Technology. 2015. V.216. P.381-384. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.10.004.
6. Zhang Z., Jing H., Xu L., Han Y., Zhao L., Zhang J. Influence of microstructure and elemental partitioning on pitting corrosion resistance of duplex stainless steel welding joints // Applied Surface Science. 2017. V. 394. P. 297-314. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.10.047>.
7. Zhou Y.J., Zhang Y., Wang F.J., Wang Y.L., Chen G.L. Effect of Cu addition on the microstructure and mechanical properties of AlCoCrFeNiTi0.5 solid-solution alloy // Journal of Alloys and Compounds. 2008. V. 466. P. 201-204.
8. Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural development in equiatomic multi-component alloys // Materials Science and Engineering. 2004. P. 213-218.
9. Kivinema E.I., Olson D.L., Maltock D.K. Particulate - reinforced metal matrix composite as a weld deposit // Welding Journal. 1995. V. 3. P. 83-92.
10. Mejía I., Bedolla-Jacuinde A., Maldonado C., Cabrera J.M. Hot Ductility Behavior of a Low Carbon Advanced High Strength Steel (AHSS) Microalloyed with Boron // Materials Science and Engineering. 2011. V. 528. P. 4468-4474.
11. Sheng G., Liu C.T. Phase stability in high entropy alloys: Formation of solid-solution phase or amorphous phase // Progress in Science: Materials International. 2011. V. 21. P. 433-446.
12. Jien-Wei Y., Shou-Yi C., Yu-Der H., Swe-Kai C., Su-Jien L. Anomalous decrease in X-ray diffraction intensities of Cu-Ni-Al-Co-Cr-Fe-Si alloy systems with multi-principal elements // Materials Chemistry and Physics. 2007. V. 103. P. 41-46.
13. Pires J.N., Loureiro A., Böllmsjö G. Welding Robots Technology, System Issues and Applications // Library of Congress Control Number: 2005933476 ISBN-10: 1-85233-953-5 e-ISBN 1-84628-191-1 Printed on acid-free paper ISBN-13: 978-1-85233-953-1. 180 pp.
14. Kodama S. Et al. Characteristics of drip transfer by short circuits during high-speed welding of MAG with burner fluctuations // Quarterly Journal of the Japanese Welding Society. 2005. V. 23. No. 2. P. 260-269.
15. Shubako S. Et al. Characteristics of an arc column on a hollow cathode // Quarterly Journal of the Japanese Welding Society. 2005. V. 23. No. 2. P. 270-275.
16. Saraev Yu.N., Bezborodov V.P. Effect of the Energy Parameters of the Welding Process on the Structure and Properties of welded Joints in low-alloy Steels // Welding International. 2013. №. 9. P. 678-680.
17. Saraev Y.N., Bezborodov V.P., Shtertser A.A., Ul'yanyskii V.Y., Orishich A.M., Il'yushchenko A.F., Skakov M.K. Modification of Coatings by refractory Compound to Impresse the service Relia-

bility of Components // *Welding International*. 2012. № 11. P. 881-886.

18. Сараев Ю.Н., Безбородов В.П., Тютев А.В. Влияние параметров импульсного процесса электрошлаковой наплавки на структуру и абразивную износостойкость Fe-C-Cr-Mn-покрытий // *Сварочное производство*. 2005. № 10. С. 13-17.
19. Сараев Ю.Н., Безбородов В.П., Селиванов Ю.В., Никонова И.В. Влияние режимов наплавки покрытий на коррозионную стойкость в кислых средах сварных соединений аустенитных сталей // *Обработка металлов*. 2007. № 2. С. 33-36.
20. Saraev Yu.N., Bezborodov V.P., Grigoryeva A.A., Golikov N.I., Dmitriev V.V., Sannikov I.I. Distribution of residual stresses in welded joints in 09G2S steel produced by adaptive pulsed-arc welding // *Welding International*. 2015. V. 29. № 2. P. 131-134.
21. Saraev Yu.N., Bezborodov V.P. Effect of the Energy Parameters of the Welding Process on the Structure and Properties of welded Joints in low-alloy Steels // *Welding International*. 2013. № 9. P. 678-680.
22. Saraev Y.N., Bezborodov V.P., Shtertser A.A., Ul'yaniyskii V.Y., Orishich A.M., P'yushchenko A.F., Skakov M.K. Modification of Coatings by refractory Compound to Impresse the service Reliability of Components // *Welding International*. 2012. № 11. P. 881-886.
23. Копанева Е.Н. Обзорная характеристика технологии процесса электрохимического нанесения металлов. // *Вопросы радиоэлектроники*. 2016. № 1. С. 62-67.
24. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Силантьев С.А., Федонина С.О. Влияние процесса упрочнения волной деформации на микроструктуру материала // *Научно-технические технологии в машиностроении*. 2019. № 4. С.13-17.
25. Киричек А.В., Баринов С.В., Яшин А.В., Зайцев А.А., Константинов А.М. Влияние обрабаты-

ваемой среды на эффективность передачи энергии ударного импульса при волновом деформационном упрочнении // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2019. № 11 (84). - С. 13-18. DOI: 10.30987/1999-8775-2019-2019-11-13-18.

26. Киричек А.В., Баринов С.В., Давыдов С.В., Яшин А.В., Зайцев А.А., Константинов А.М. Микроструктурные изменения в стали 45, вызванные волновым деформационным упрочнением // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2017. № 8 (61). С. 79-85. DOI: 10.12737/article_5a3779ff9bec74.56692716.
27. Сараев Ю.Н., Безбородов В.П., Селиванов Ю.В. Особенности формирования защитных коррозионностойких покрытий при импульсной электродуговой наплавке сталей аустенитного класса // *Сварочное производство*. 2009. № 4. С. 20-25.
28. Модифицирование защитных покрытий тугоплавкими соединениями и высокоэнергетическим воздействием. // *Перспективные материалы*. 2011. № S13, С. 790-796.
29. Сараев Ю.Н. Импульсные технологические процессы сварки и наплавки. Новосибирск: Наука, 1994. 108 с.
30. Saraev Y.N., Lunev A.G., Semenchuk V.M., Nepomnyashchiy A.S., Strelnikov P.A. Enhancing an arc welding technology by the methods of adaptive pulsed control of energetic parameters // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019. V. 681. P. 012038.
31. Сараев Ю.Н., Семенчук В.М., Непомнящий А.С., Григорьева А.А. Физико-технические аспекты разработки адаптивных импульсно-дуговых методов сварки и наплавки плавящимся электродом // *Тяжелое машиностроение*. 2021. N 5-6. С. 23-31.

REFERENCE

1. Hasui A, Morigaki O. Surfacing and spraying. Moscow: Mashinostroenie; 1985.
2. Dudko DL, Sidoruk VS, Tyagun-Belous GS. Ways to reduce heat input into the welded metal during electroslag welding of thick-walled structures. *Automatic Welding*. 1982;10:48-50.
3. Saburov VP. Hardening modification of steel and alloys. *Liteinoe Proizvodstvo*. 1998;9:7-8.
4. Eremin EN. Application of nanoparticles of refractory compounds to improve the quality of welded joints made of heat-resistant alloys. *Omsk Scientific Bulletin*. 2009;3:63-67.
5. Keskitalo M, Mäntyjärvi K, Sundqvist J, Powell J, Kaplan AFH. Laser welding of duplex stainless steel with nitrogen as shielding gas. *J of Mater. Process. Technol.* 2015;216:381-384. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.10.004.
6. Zhang Z, Jing H, Xu L, Han Y, Zhao L, Zhang J. Influence of microstructure and elemental partitioning on pitting corrosion resistance of duplex stain-

less steel welding joints. *Applied Surface Science*. 2017; 394:297-314. DOI:

7. Zhou YJ, Zhang Y, Wang FJ, Wang YL, Chen GL. Effect of Cu addition on the microstructure and mechanical properties of AlCoCrFeNiTi0.5 solid-solution alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2008;466:201-204.
8. Cantor B, Chang ITH, Knight P, Vincent AJB. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. *Materials Science and Engineering*. 2004;213-218.
9. Kivinema EI, Olson DL, Maltock DK. Particle - reinforced metal matrix composite as a weld deposit. *Welding Journal*. 1995;3:83-92.
10. Mejía I, Bedolla-Jacuinde A, Maldonado C, Cabrera JM. Hot Ductility Behavior of a Low Carbon Advanced High Strength Steel (AHSS) Microalloyed with Boron. *Materials Science and Engineering*. 2011; 528:4468-4474.

11. Sheng G, Liu CT. Phase stability in high entropy alloys: Formation of solid-solution phase or amorphous phase. *Progress in Science: Materials International*. 2011;21:433-446.
12. Jien-Wei Y, Shou-Yi C, Yu-Der H, Swe-Kai C, Su-Jien L. Anomalous decrease in X-ray diffraction intensities of Cu-Ni-Al-Co-Cr-Fe-Si alloy systems with multi-principal elements. *Materials Chemistry and Physics*. 2007;103:41-46.
13. Pires JN, Loureiro A, Böllmsjo G. *Welding Robots Technology, System Issues and Applications*. Library of Congress Control Number: 2005933476.
14. Kodama S. et al. Characteristics of drip transfer by short circuits during high-speed welding of MAG with burner fluctuations. *Quarterly Journal of the Japanese Welding Society*. 2005;23(2):260-269.
15. Shubako S. et al. Characteristics of an arc column on a hollow cathode. *Quarterly Journal of the Japanese Welding Society*. 2005;23(2):270-275.
16. Saraev YuN, Bezborodov VP. Effect of the Energy Parameters of the Welding Process on the Structure and Properties of welded Joints in low-alloy Steels. *Welding International*. 2013;9:678-680.
17. Saraev YN, Bezborodov VP, Shtertser AA, Ulyaniyskii VY, Orishich AM, Ilyushchenko AF, Skakov MK. Modification of Coatings by refractory Compound to Impress the service Reliability of Components. *Welding International*. 2012;11:881-886.
18. Saraev YuN, Bezborodov VP, Tyutev AV. Influence of parameters of electroslag surfacing pulsed process on the structure and abrasive wear resistance of Fe-C-Cr-Mn coatings. *Svarochnoe Proizvodstvo*. 2005;10:13-17.
19. Saraev YuN, Bezborodov VP, Selivanov YuV, Nikonova IV. Influence of coating surfacing modes on corrosion resistance in acidic environments of welded joints of austenitic steels. *Obrabotka Metallov*. 2007;2:33-36.
20. Saraev YuN, Bezborodov VP, Grigoryeva AA, Golikov NI, Dmitriev VV, Sannikov II. Distribution of residual stresses in welded joints in 09G2S steel produced by adaptive pulsed-arc welding. *Welding International*. 2015; 29(2):131-134.
21. Saraev YuN, Bezborodov VP. Effect of the Energy Parameters of the Welding Process on the Structure and Properties of welded Joints in low-alloy Steels. *Welding International*. 2013;9:678-680.
22. Saraev YN, Bezborodov VP, Shtertser AA, Ulyaniyskii VY, Orishich AM, Ilyushchenko AF, Skakov MK. Modification of Coatings by refractory Compound to Impress the service Reliability of Components. *Welding International*. 2012;11:881-886.
23. Kopaneva EN. Overview of the technology to process electrochemical deposition of metals. *Voprosi Radioelektroniki*. 2016;1:62-67.
24. Kirichek AV, Solovyov DL., Silantyev S.A., Fedonina S.O. Impact of wave deformation strengthening process upon material micro-structure. *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2019;4:13-17.
25. Kirichek AV, Barinov SV, Yashin AV, Zaitsev AA, Konstantinov AM. Impact of environment processed upon effectiveness of shock pulse energy transfer at wave deformation strengthening. *Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2019;11(84):13-18. DOI: 10.30987/1999-8775-2019-2019-11-13-18.
26. Kirichek AV, Barinov SV, Davydov SV, Yashin AV, Zaitsev AA, Konstantinov AM. Microstructural changes in steel 45 caused by wave strain strengthening. *Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2017;8(61):79-85. DOI: 10.12737/article_5a3779ff9bec74.56692716.
27. Saraev YuN, Bezborodov VP, Selivanov YuV. Features of forming protective corrosion-resistant coatings at pulsed electric arc surfacing of austenitic steels. *Svarochnoe Proizvodstvo*. 2009;4: 20-25.
28. Modification of protective coatings with refractory compounds and high-energy effects. *Perspektivnye Materialy*. 2011;S13:790-796.
29. Saraev YuN. *Pulsed technological processes of welding and surfacing*. Novosibirsk: Nauka; 1994.
30. Saraev YN, Lunev AG, Semenchuk VM, Nepomnyashchy AS, Strelnikov PA. Enhancing an arc welding technology by the methods of adaptive pulsed control of energetic parameters. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019;681:012038.
31. Saraev YuN, Semenchuk VM, Nepomnyashchy AS, Grigorieva AA. Physical and technical aspects of the development of adaptive pulse-arc welding and surfacing methods with a melting electrode. *Russian Journal of Heavy Machinery*. 2021;5-6:23-31.

Информация об авторах:

Сараев Юрий Николаевич, доктор технических наук, доцент, тел. 8-3822-492-942, главный научный сотрудник лаборатории композиционных материалов Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН.

Безбородов Валерий Павлович, кандидат технических наук, тел. 8-3822-286-850, старший научный сотрудник лаборатории композиционных материалов Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН, международные идентификационные номера автора: Scopus-Author ID 7006789671, WOS Research ID AAO-4724-2021,

Author-ID-РИНЦ 134164.

Перовская Марина Владимировна, кандидат технических наук, тел. 8-3822-286-833, научный сотрудник лаборатории композиционных материалов Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН, международные идентификационные номера автора: Scopus-Author ID 7801552584, Research- ID-Web of Science G-4439-2016, Author-ID-РИНЦ 127228.

Семенчук Вячеслав Максимович, аспирант, тел. 8-3822-492-942, младший научный сотрудник лаборатории композиционных материалов Института

физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН, международные идентификационные номера автора: Scopus-Author ID 57205198525, Research- ID-Web of Science AAG-6029-2020, Author-ID-РИНЦ 1053970.

Григорьева Алина Анатольевна, инженер лаборатории композиционных материалов Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН, тел. 8-3822-286-833, международные идентификационные номера автора: Scopus-

Information about the authors:

Saraev Yuri Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Chief Researcher of the Laboratory of Composite Materials at the Institute of Strength Physics and Materials Science of SB RAS, phone: 8-3822-492-942

Bezborodov Valery Pavlovich, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of the Laboratory of Composite Materials at the Institute of Strength Physics and Materials Science of SB RAS, phone: 8-3822-286-850; Scopus-Author ID 7006789671, WOS Research ID AAO-4724-2021, Author-ID- RSCI 134164.

Perovskaya Marina Vladimirovna, Candidate of Technical Sciences, Researcher of the Laboratory of Composite Materials at the Institute of Strength Physics and Materials Science of SB RAS, phone: 8-3822-286-833; Scopus-Author ID 7801552584, Research-ID-Web of Science G-4439-2016, Author-ID- RSCI 127228.

Semenchuk Vyacheslav Maksimovich, Postgraduate

Author ID 56236093100, Research- ID-Web of Science ABC-2127-2021, Author-ID-РИНЦ 647320.

Непомнящий Александр Сергеевич, студент Томского политехнического университета, техник лаборатории композиционных материалов Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН, тел. 8-3822-492-942, международные идентификационные номера автора: Scopus-Author ID 57214112524, Research- ID-Web of Science ABC-8254-2021, Author-ID-РИНЦ 1104938.

Student, Junior Researcher of the Laboratory of Composite Materials at the Institute of Strength Physics and Materials Science of SB RAS, phone: 8-3822-492-942; Scopus-Author ID 57205198525, Research- ID-Web of Science AAG-6029-2020, Author-ID- RSCI 1053970.

Grigorieva Alina Anatolyevna, Engineer of the Laboratory of Composite Materials at the Institute of Strength Physics and Materials Science of SB RAS, phone: 8-3822-286-833; Scopus-Author ID 56236093100, Research- ID-Web of Science ABC-2127-2021, Author-ID- RSCI 647320.

Nepomnyashchy Aleksander Sergeevich, Student of Tomsk Polytechnic University, technician of Laboratory of Composite Materials at the Institute of Strength Physics and Materials Science of SB RAS, phone: 8-3822-492-942; Scopus-Author ID 57214112524, Research- ID-Web of Science ABC-8254-2021, Author-ID- RSCI 1104938.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 27.10.2021; одобрена после рецензирования 30.03.2022; принята к публикации 21.04.2022.

The article was submitted to the editorial office on 27.10.2021; approved after review on 30.03.2022; accepted for publication on 21.04.2022.