

Оригинальная статья

УДК 621.763

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-4(54)-112-121

**ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ПУТЕМ
МОДИФИЦИРОВАНИЯ КАРБИДАМИ ТУГОПЛАВКИХ ХИМИЧЕСКИХ
СОЕДИНЕНИЙ**

© 2025 г. А. Д. Трофимова, И. В. Строкина, М. Х. Нориега Флорес, В. С. Маринич

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Прогресс в области производства жаропрочных сплавов, ядерной энергетики, промышленной высокотемпературной химии обуславливает необходимость применения материалов, способных выдерживать воздействие высоких температур, а также совершенствование функциональных и эксплуатационных характеристик (твердости, прочности, износостойкости, коррозионной стойкости, срока службы) сталей и чугунов. Существующие соединения обладают низкими термостойкими свойствами и ограниченным ресурсом работы, повышение которого – актуальная задача, решаемая при помощи модификации. Модификация является одним из эффективных и относительно недорогих способов изменения структуры различных промышленных сплавов. Наиболее перспективными материалами, имеющими длительный срок эксплуатации и сохраняющими высокую твердость в широком диапазоне температур, являются карбиды тугоплавких химических соединений. Рассмотрены различные способы модификации карбидами тугоплавких металлов. Представлена характеристика многослойных и однослойных покрытий. Приведено обоснование модифицирующего эффекта, оказываемого на структуру сплавов тугоплавкими химическими соединениями карбидов. Результаты модификации углеродистой конструкционной стали карбидом вольфрама показали повышение ресурса работы стали на 70 %. Выявлено, что высокая доля зерна карбидной тугоплавкой фазы обеспечивает малый размер кристаллов, что приводит к более высокой твердости и прочности покрытия. Анализ модифицированной поверхности алюминия показал зависимость свойств поверхностного слоя от режимов процесса модификации. Установлено, что карбид тантала склонен к термическому разрушению, устраниему дополнительным легированием. Представленные подходы к модификации поверхности металлов и сплавов могут стать решением проблемы отсутствия материалов, применяемых при нагреве высокотемпературными потоками до температур, превышающих 2000 – 2500 °C, в условиях воздействия агрессивных сред.

Ключевые слова: карбиды тугоплавких химических соединений, модификация сплавов, высокотемпературные покрытия, защитные покрытия, термостойкость, легирование, наноструктурное состояние, ресурс работы, металлокерамические композитные материалы, кристаллическая структура

Финансирование. Исследование выполнено за счет средств ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» (договор № 118/2025/УНИ).

Для цитирования: Трофимова А.Д., Строкина И.В., Нориега Флорес М.Х., Маринич В.С. Получение высокотемпературных защитных покрытий путем модификации карбидами тугоплавких химических соединений. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;4(54):112–121. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-4\(54\)-112-121](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-4(54)-112-121)

Original article

PRODUCTION OF HIGH-TEMPERATURE PROTECTIVE COATINGS BY MODIFICATION OF HARD-FUSING CARBIDES OF CHEMICAL COMPOUNDS

© 2025 A. D. Trofimova, I. V. Strokina, M. J. Noriega Flores, V. S. Marinich

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

Abstract. Progress in the production of heat-resistant alloys, nuclear energy, and industrial high-temperature chemistry necessitates the use of materials capable of withstanding high temperatures, as well as improving the functional and operational characteristics (hardness, strength, wear resistance, corrosion resistance, and service life) of steels and cast iron. Existing compounds have low heat-resistant properties and a limited service life, increasing which is an urgent task that can be solved by modification. Modification is one of the effective and relatively inexpensive ways to change the structure of various industrial alloys. The most promising materials having a long service life and maintaining high hardness over a wide temperature range are carbides of refractory chemical compounds. Various ways of modifying refractory metals with carbides are considered. The characteristics of multilayer and single-layer coatings are presented. The substantiation of the modifying effect exerted on the structure of alloys by refractory chemical compounds of carbides is given. The results of modification of carbon structural steel with tungsten carbide showed an increase in the service life of steel by 70%. It is revealed that a high proportion of the carbide refractory phase grain ensures a small crystal size, which leads to higher hardness and strength of the coating. The analysis of the modified aluminum surface showed the dependence of the properties of the surface layer on the modes of the modification process. It has been established that tantalum carbide is prone to thermal destruction, eliminated by additional alloying. The presented approaches to modifying the surface of metals and alloys can be a solution to the problem of the lack of materials used when heated by high-temperature flows to temperatures exceeding 2000-2500 °C under the influence of aggressive media.

Keywords: carbides of refractory chemical compounds, alloy modification, high-temperature coatings, protective coatings, heat resistance, alloying, nanostructured state, service life, metal-ceramic composite materials, and crystal structure

Funding. The research was carried out at the expense of the funds of the Siberian State Industrial University (contract No. 118/2025/UNI).

For citation: Trofimova A.D., Strokina I.V., Noriega Flores M.J., Marinich V.S. Obtaining high-temperature protective coatings by modifying refractory chemical compounds with carbides. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;4(54):112–121. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-4\(54\)-112-121](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-4(54)-112-121)

Введение

В современных условиях производства рабочие поверхности конструкционных материалов (металлов, композитов, керамики, стекла) подвергаются различным внешним воздействиям: широкому диапазону температур, создаваемому в зоне контакта материалов; высокому абразивному износу; механическим и скоростным манипуляциям, приводящим к резкому снижению твердости и износостойкости.

В связи с этим, перед металлургической отраслью возникает несколько задач [1]:

1 – совершенствование композиций теплоизоляционных материалов (ТИМ): существующие недостаточно надежны, из-за высоких тепловых нагрузок;

2 – разработка мероприятий в области производства керамических материалов, поскольку керамика, в силу повышенной хрупкости, не способна противостоять резким колебаниям температур, вызывающим термические напряжения, что ведет к разрушению конструкции.

Это приводит к необходимости модификации и оптимизации составов за счет формирования высокотемпературных покрытий, которые не разрушаются в условиях контакта с агрессивными рабочими средами (твердыми, жидкими и газообразными) при температурах, достигающих 1200 °C в течение заданного периода эксплуатации. В зависимости от способа образования защитного слоя покрытия классифицируют на многослойные и однослойные [2]. Много-

Т а б л и ц а 1

Характеристики карбидов тугоплавких металлов [7]
Characteristics of carbides of refractory metals [7]

Параметр	Значение параметра						
Химическая формула	ZrC	TaC	TiC	NbC	VC	WC	Mo ₂ C
Структурный тип	ГЦК	ОЦК	ГПУ	ГЦК	ОЦК	ГЦК	ГПУ
Координационное число	8	8	6	8	6	8	4, 6, 8
Теплота образования из элементов (ΔH_{298}), кДж/моль	-120	-145	-232	-141	-102	-35	-46
Температура плавления ($T_{пл}$), К	3718	4258	3340	3480	2921	3049	2700
Микротвердость, ГПа	28,4	18,0	31,0	20,5	27,4	23,5	15,0

слойные покрытия – это структуры, в которых каждый слой выполняет отдельную функцию:

- защитный (верхний) слой характеризуется максимальной эксплуатационной стойкостью и низкой способностью к химическим взаимодействиям, в силу прочных поверхностных связей соединения;
- основной (средний) слой осуществляет длительную выдержку в условиях высоких температур, сохраняя требуемые физико-механические свойства, то есть обеспечивает жаростойкость;
- грунтовочный (нижний) слой является барьерным, так как при высокотемпературном взаимодействии поверхности с материалом подложки он препятствует отслаиванию покрытия.

В качестве компонентов однослойных покрытий зачастую используются оксиды тугоплавких металлов (ZrO_2 , HfO_2 , Al_2O_3), недостатком которых является растрескивание верхнего слоя при термических ударах, обусловленное повышенной хрупкостью оксидов и разницей теплофизических параметров между материалом покрытия и подложкой, вследствие чего этот вид покрытий применяется как грунтовочный (нижний) слой [3; 4].

В настоящее время существуют различные методы получения высокотемпературных покрытий, основанные на упрочнении металлов и сплавов [5]. Наряду с применением термических и химико-термических процессов, наплавки (нанесение слоя металла или сплава на поверхность изделия путем сплавления для упрочнения поверхности), напыления (нанесение вещества в раздробленном состоянии для устранения физико-механических дефектов поверхности) реали-

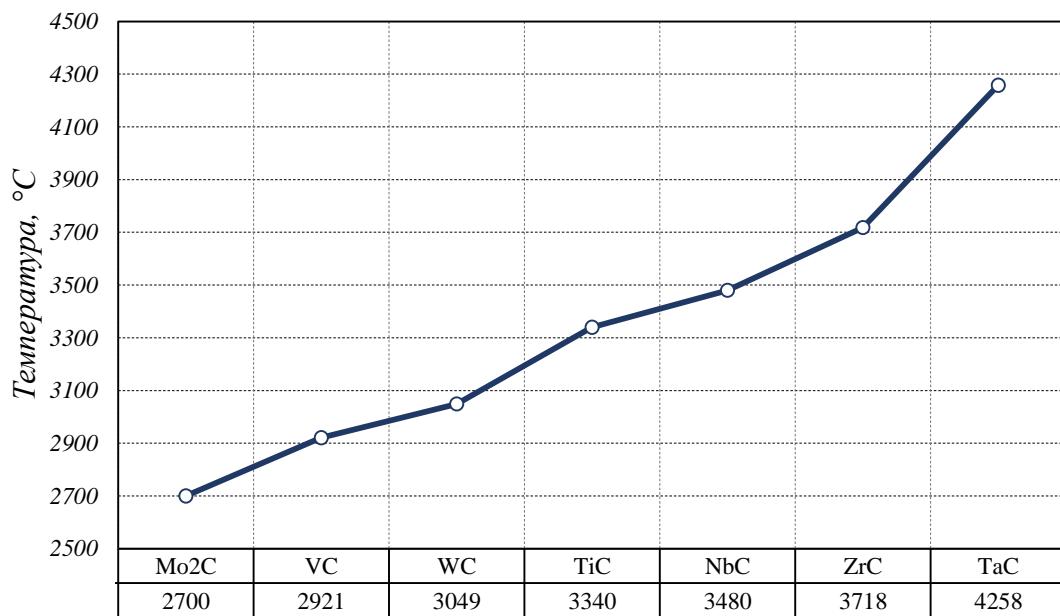
зуются способы формирования качественных поверхностей путем модифицирования карбидами тугоплавких химических соединений, что достигается введением в металлическую матрицу дисперсных тугоплавких упрочняющих фаз и равномерного их распределения в структуре. С целью повышения срока службы и ресурса работы достаточно модифицировать лишь верхний слой материалов.

Обсуждение

Для модифицирования поверхности применяют карбиды вольфрама (WC), ванадия (VC), титана (TiC), tantalа (TaC), также карбиды ниобия (NbC) и циркония (ZrC), которые характеризующихся значительной твердостью, химической инертностью, довольно высокой тепло- и электропроводностью [6].

В табл. 1 представлены характеристики карбидов тугоплавких соединений, которые в значительной мере влияют на свойства разнообразных сплавов, так как обладают высокой термодинамической стабильностью в металлических расплавах, жаростойкостью и жаропрочностью, температурой плавления и коррозионной стойкостью.

Микротвердость карбидов определяется статическим весом (энергией атомов, отражающей распределение электронов по электронным оболочкам) стабильных электронных конфигураций атомов металла и углерода и увеличивается с ростом статического веса sp^3 конфигураций углерода. Установлено, что микротвердость карбидов tantalа и циркония с уменьшением содержания углерода линейно падает [8].



Карбиды тугоплавких металлов

Рис. 1. Карбиды тугоплавких металлов и соответствующие температуры эксплуатации [10]

Fig. 1. Refractory metal carbides and corresponding operating temperatures [10]

Карбиды, обладая высокой твердостью и термической стойкостью, повышают устойчивость к окислению у материалов. При этом твердость карбидов тугоплавких соединений основана на энергии межатомных связей, то есть энергии кристаллической решетки, определяющейся электронным строением элементов, входящих в соединение [9].

Термическая стойкость рассматриваемых соединений зависит от условий эксплуатации. Максимальные температуры применения карбидов тугоплавких металлов находятся в диапазоне 2000 – 4300 °C (рис. 1). Наиболее высокими температурами плавления обладают карбиды тантала TaC (4258 °C), циркония ZrC (3718 °C) и ниобия NbC (3480 °C), что свидетельствует об их способности сохранять функциональные свойства при высоких степенях нагрева.

Модифицирование поверхности влияет на процесс кристаллизации отливки [11; 12]. Введение карбидов тугоплавких металлов в расплав перед кристаллизацией способствует формированию жесткой структуры, значительно затрудняющей процесс деформации, и получению мелкозернистой структуры отливок. Частицы карбидов, во-первых, являются дополнительными центрами кристаллизации, ускоряющими процесс затвердевания металла, во-вторых, блокируют диффузию соответствующих атомов к зарождению и росту кристаллов. В настоящей работе исследован процесс модифицирования карбидом вольфрама WC [13; 14], который включает два этапа:

1 – высокотемпературная пластическая деформация (порошок карбида вольфрама внедряется в углеродистую конструкционную сталь, посредством прокатки стального ролика по поверхности детали под контролируемой нагрузкой);

2 – высокотемпературное термическое упрочнение (используется ролик из композита карбид вольфрама – медь, что создает высокие температуры и давления в точке контакта; происходит аустенитизация поверхностного слоя стали и упрочнение покрытия в зоне контакта ролика и обрабатываемого изделия за счет внедрения карбидной фазы).

В результате формируется трехслойная структура с постепенным изменением свойств по глубине (рис. 2) [15], включающая первый

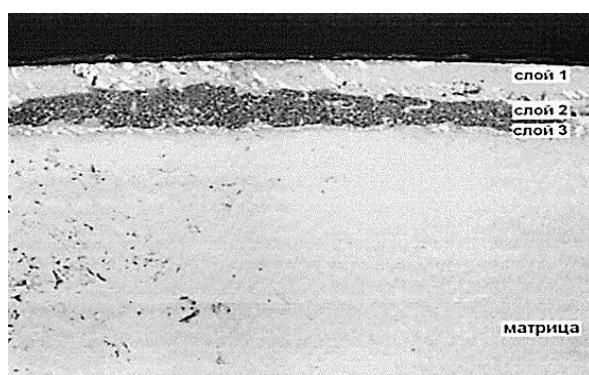


Рис. 2. Трехслойная градиентная структура модифицированной поверхности углеродистых конструкционных сталей карбидом вольфрама [15]

Fig. 2. Three-layer gradient structure of the modified surface of carbon structural steels with tungsten carbide [15]

защитный слой (180 – 220 мкм), насыщенный исходными частицами карбида вольфрама; второй основной слой (200 – 250 мкм), состоящий из ячеистой структуры аустенитных зерен, границы которых армированы карбидо-вольфрамовой сеткой; третий грунтовочный слой (20 – 40 мкм), насыщенный карбидом вольфрама.

Карбид вольфрама формирует высокотемпературное покрытие путем увеличения глубины и степени упрочнения поверхности, также придает изделию теплостойкость, стабильное фазовое, микро- и наноструктурное состояние. Результаты модификации продемонстрировали повышение ресурса работы углеродистой стали на 70 % [16].

Другим способом повышения ресурса работы и термической стойкости углеродистой стали является уменьшение размера зерна карбидной фазы с помощью интенсивного размола смеси. Недостатком рассматриваемого метода является механоактивация частиц карбида вольфрама, когда они запасаются избыточной энергией [17], то есть приобретают свойство образовывать новые химические связи, вследствие механической обработки, вызванной смещением атомов соединения относительно друг друга. В результате спекания таких сплавов происходит интенсивный рост зерен WC из-за перекристаллизации через жидкую фазу, что приводит к снижению пластичности сплавов [18].

Кроме того, перспективным соединением для модификации является карбид тантала TaC, использующийся для получения высокотемпературных защитных покрытий, благодаря высоким показателям модуля упругости (300 – 450 ГПа) [19], сопротивлением износу при трении, устойчивостью к агрессивному химическому воздействию и окислению (до температуры 2000 °C). Однако карбид тантала склонен к хрупкости (термическому разрушению) из-за появления трещин.

Для устранения этого недостатка карбид тантала дополнительно легируют [20] компонентами, обладающими растворимостью в основной фазе (Cr, Ni), что усиливает характеристики покрытий из-за деформации решетки при формировании новых растворов, а также стабилизирующими аморфную структуру в металлических расплавах (Si, B) и способствующими модификации структуры покрытий с образованием нанокомпозита, что повышает механические свойства. Выявлено, что дополнительно легированный карбид тантала обладает гомогенной структурой без дефектов с главной составной частью (ГЦК-фазой TaC).

В настоящее время известны методы применения металлокерамических композитных материалов с матрицей на основе алюминия, упроч-

ненной тугоплавкими частицами карбидов титана TiC и циркония ZrC [21; 22]. Композиционные материалы с алюминиевой матрицей отличаются высокой прочностью в сочетании с малой плотностью [23]. При модифицировании поверхности алюминия карбидом титана образуется фиксированное соотношение между элементами (интерметаллид $TiAl_3$ с упрочненной фазой). Модифицирование частицами карбида титана позволяет получить материал с низким коэффициентом трения, повышенной износостойкостью [24].

Карбидные соединения ZrC на поверхности алюминия формируют более высокую твердость в сравнении с немодифицированным образцом, что обусловлено снижением коэффициента трения [25]. Повышенная твердость указывает на низкую подвижность дислокаций в карбиде [26]. Незначительное снижение механических свойств может быть вызвано небольшой дефектностью (пористостью) микроструктуры модифицируемого образца. Известно, что структура немодифицированного алюминия обладает сильно выраженным дендритным строением: вся площадь шлифа состоит из дендритов, ориентированных в направлении центральной части отливки [27]. Анализ модифицированной поверхности алюминия свидетельствует о наличии в металле кристаллов двух типов (дендритных и полиэдрических).

Однако внедрение и однородное распределение тугоплавких частиц по всему объему алюминия затруднительно, так как частицы модификатора склонны к образованию скоплений (агломераций), слипанию и недостаточной смачиваемости по отношению к жидкому алюминию. Одним из способов решения этой проблемы является технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [28], при котором частицы модификатора образуются непосредственно в объеме алюминия.

Заметное улучшение характеристик отмечено при модификации сплава ВК-6 (94 % WC; 6 % Co) карбидом ванадия VC методом горячего прессования (спекания) при температуре 1400 °C [29]. При такой температуре кобальт плавится и смачивает порошки карбидов, далее при снижении температуры он кристаллизуется, выполняя роль связующего элемента между частицами карбидов, формируя единую структуру сплава [30]. В результате эксперимента получаются образцы твердого сплава на основе модифицированного сплава ВК-6 системы WC – VC – Co (табл. 2).

Модификация карбидом ванадия стабилизирует и уменьшает размер зерна образцов твердых сплавов (рис. 3), при этом наблюдается

Твердый сплав ВК-6 с добавками карбида VC [31]
Table 2. VK-6 hard alloy with VC carbide additives [31]

Образец	Состав образца, мас. %		
	WC	Co	VC
0	94	6	0
1	93	6	1
2	91	6	3
3	87	6	7
4	85	6	9
5	82	6	12

их наноструктурирование, что приводит к росту износостойкости на 33 – 50 % и прочности, а также влияет на устойчивость сплава в области высоких температур.

Выводы

Высокая доля зерна карбидной тугоплавкой фазы обеспечивает малый размер кристаллов, что приводит к более высокой твердости покрытия по сравнению с немодифицированным образцом. При создании высокотемпературных защитных покрытий на изделиях разного типа важно учитывать состав одно- и многослойных покрытий, технологию их нанесения и способ формирования. Установлено, что модифицирование существенно влияет на свойства поверхности обрабатываемых изделий, их эксплуатационные характеристики (повышает стойкость к истиранию, обеспечивает упрочнение за счет формирования высокотемпературного карбидного покрытия). Изменение параметров модифицирования карбидами тугоплавких металлов, а также толщины слоя образца позволяет регулировать химический состав элементов и стойкость образующегося покрытия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Климов Д.А., Мыктыбеков Б., Низовцев В.Е., Ухов П.А. Перспективы применения наноструктурных композиционных материалов

на основе карбидов и оксидов тугоплавких металлов для авиакосмических объектов. В кн.: *Труды МАИ. Технологии материалов*. 2011:1–8.

- Елизарова Ю.А., Захаров А.И. Высокотемпературные защитные покрытия функционального назначения. *Научные исследования и разработки. Новые огнеупоры*. 2020;(10):52–60.
- Hatamleh M. I., Mahadevan J., Malik A. Prediction of residual stress random fields for selective laser melted A357 aluminum alloy subjected to laser shock peening. *Journal of Manufacturing Science & Engineering*. 2019;141(10):101011.
- Сатаева Н.Е., Емельяненко К.А., Домантовский А.Г. Лазерная обработка алюминиевых сплавов для создания атмосферостойких супергидрофобных покрытий. *Российские нанотехнологии*. 2020;15(2):158–163.
- Куис Д.В., Волочко А.Т., Шегидевич А.А., Свидунович Н.А., Омелиусик А.В., Лежнев С.Н., Мухамедзянова Э.Р., Кузнецова О.Н. Композиционные материалы, полученные при обработке алюминиевого расплава лигатурами, содержащими углеродные частицы. *Вестник Казанского технологического университета*. 2014;17(18):143–145.

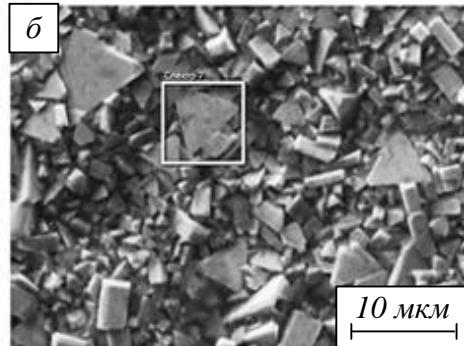
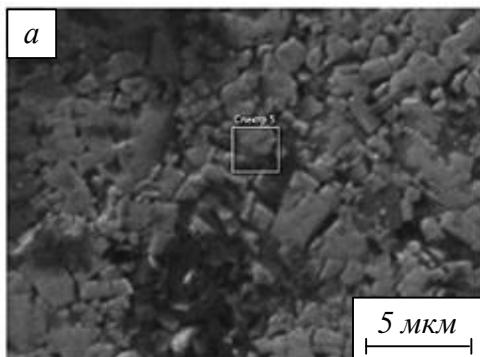


Рис. 3. Поверхность образцов ВК-6 без карбида (а) и с 1 % VC (б) [31]
Fig. 3. The surface of VK-6 samples without carbide VC (a) and with 1% VC (b) [31]

6. Тошев М.Т. Применение нитридов качестве модификаторов алюминия. Политехнический вестник. *Инженерные исследования*. 2019;1(45):93–96. [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-110-117](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-110-117). EDN: TDWYFZ.
7. Shinkaryov A.S., Ozherelkov D.Y., Pelevin I.A. Laser fusion of aluminum powder coated with diamond particles via selective laser melting: Powder preparation and synthesis description. *Coatings*. 2021;11(10):1219.
8. Liu A., Guo M., Hu H. Improved wear resistance of low carbon steel with plasma melt injection of WC particles. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2010;1(19):848–851.
9. Шульман Д.А., Скудин В.В., Шамкина Н.А. Получение тонких слоев карбидов молибдена на поверхности микрофильтрационных мембран. *Успехи в химии и химической технологии*. 2010;5(24):46–51.
10. Рузиев У.Н., Гуро В.П., Шарипов Х.Т., Каюмов Б.Б., Ниязматов А.А. Сырье для модифицированных твердых сплавов на основе карбida вольфрама. *Химический журнал Казахстана*. 2022;1(77):37 – 48.
11. Schalk N., Tkadletz M., Mitterer C. Hard coatings for cutting applications: Physical vs. chemical vapor deposition and future challenges for the coatings community. *Surface and Coatings Technology*. 2022;2(15):429–441. <https://doi.org/10.1016/j.surco.2021.127949>
12. Нориега Флорес М.Х., Строкина И.В., Трофимова А. Д. и др. Анализ методов модификации алюминиевых сплавов. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;2(52):110–117. [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-110-117](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-110-117). EDN: TDWYFZ.
13. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Третьяков Р.С., Мисюров А.И., Асютин Р.Д., Дренин А.А., Пересторонин А.В. Повышение износостойкости стали методом лазерного поверхностного модификации карбидом вольфрама. *Вестник ВНИИЖТ*. 2019;78(5):290–296.
14. Крючков П.М. Совершенствование твердого сплава для буровых работ за счет применения вакуумного спекания в сочетании с легированием карбидом тантала. *Физическая мезомеханика. Технологии материалов*. 2002;20(4):117 – 121.
15. Mariappan T. Recent developments of intumescent fire protection coatings for structural steel: A review. *Journal of Fire Sciences*. 2016;34(2):120–163.
16. Kumar S., Singh R., Singh T.P., Sethi B.L. Surface modification by electrical discharge machining: A review. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009;209(8):367–368.
17. Сытченко А.Д., Фатыхова М.Н., Кузнецов В.П., Купцов К.А., Петржик М.И., Кудряшов А.Е., Кирюханцев-Корнеев Ф.В. Покрытия на основе карбida тантала, полученные методами магнетронного распыления и электроискрового легирования, для повышения износостойкости деталей запорной арматуры. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2023;17(3):67–78.
18. Калюжный Д.Г., Палабугин М.В., Бурнышев И.Н., Лыс В.Ф., Ладьянов В.И. Формирование керамического покрытия на поверхности алюминиевого сплава ВАЛ10 при лазерном модифицировании в растворе полисиликатов. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2024;18(2):53–60.
19. Кочанов Г.П., Костиков И.А., Ковалев И.А., Канныкин С.В., Шевцов С.В., Коновалов А.А. Синтез тугоплавкой керамики на основе карбida циркония прямой карбидацией циркония. *ВГТУ. Неорганические материалы*. 2023;59(2):202–207.
20. Голиков А.Ю., Головин Е.Д., Савенко Т.И., Кузнецов В.А., Черепанов А.Н. Модификация алюминиевых сплавов мелкодисперсными тугоплавкими частицами с целью повышения их механических свойств. *Известия вузов. Функциональные покрытия*. 2021;303–304.
21. Witkin D.B., Patel D.N., Helvajian H. Surface treatment of powder-bed fusion additive manufactured metals for improved fatigue life. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2019;28:681–692.
22. Zeng, Yi, Dini Wang, Xiang Xiong. Ablation-resistant carbide Zr0, 8Ti0, 2C0, 74B0, 26 for oxidizing environments up to 3000 °C. *Nature Communications*. 2017;17(8):35–46.
23. Mariappan T. Recent developments of intumescent fire protection coatings for structural steel: A review. *Journal of Fire Sciences*. 2016;34(2):120–163.
24. Jinliang Z., Qingsong W., Dave B. A review of selective laser melting of aluminum alloys: Processing, microstructure, property and developing trends. *Journal of Materials Science & Technology*. 2019;35(2):270–284.
25. Пантелеева А.В., Никонова Р.М. Модификация алюминия упрочняющими фазами TiB₂ и TiC методом СВС в расплаве. *Xu-*

- мическая физика и мезоскопия. 2019;21(1):65–69.
26. Шиганов И.Н., Самарин П.Е. Модифицирование поверхности алюминиевых сплавов карбидами кремния методом лазерного оплавления. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение.* 2012;5:62–68.
27. Olakanmi E.O., Cochrane R.F., Dalgarno K.W. A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: *Processing, microstructure, and properties. Progress in Materials Science.* 2015;74:401–477.
28. Pratik S., Subhasisa N., Guanjun W. Surface property modifications of silicon carbide ceramic following laser shock peening. *Journal of the European Ceramic Society.* 2017;37(9):302–308.
29. Luo H., Yazdi M. A., Chen S., Sun H., Gao F., Heintz O., Monteynard A., Sanchette F., Billard A. Structure, mechanical and tribological properties, and oxidation resistance of TaC/a-C:H films deposited by high power impulse magnetron sputtering. *Ceramics International.* 2022;17(3):249–250.
30. Du S., Wen M., Yang L., Ren P., Meng Q., Zhang K., Zheng W. Structural, hardness and toughness evolution in Si-incorporated TaC films. *Ceramics International.* 2018;44(8):931–935.
31. Lurie S., Belov P., Solyaev Yu., Aifantis E.C. On one class of applied gradient models with simplified boundary problems. *Mater. Phys. Mech.* 2017;32(3):353–369.
5. Kuis D.V., Volochko A.T., Shegidevich A.A., Svidunovich N.A., Omelyusik A.V., Lezhnev S.N., Mukhamedyanova E.R., Kuznetsova O.N. Composite materials obtained by processing aluminum melt with alloys containing carbon particles. *Bulletin of Kazan Technological University.* 2014;17(18):143–145. (In Russ.).
6. Toshev M.T. The use of nitrides as aluminum modifiers. *Politekhnicheskii vestnik. Inzhenernye issledovaniya.* 2019;1(45):93–96. [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-110-117](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-110-117). EDN: TDWYFZ. (In Russ.).
7. Shinkaryov A.S., Ozherelkov D.Y., Pelevin I.A. Laser fusion of aluminum powder coated with diamond particles via selective laser melting: Powder preparation and synthesis description. *Coatings.* 2021;11(10):1219.
8. Liu A., Guo M., Hu H. Improved wear resistance of low carbon steel with plasma melt injection of WC particles. *Journal of Materials Engineering and Performance.* 2010;1(19):848–851.
9. Shulman D.A., Skudin V.V., Shamkina N.A. Obtaining thin layers of molybdenum carbides on the surface of microfiltration membranes. *Advances in Chemistry and Chemical Technology.* 2010;5(24):46–51. (In Russ.).
10. Ruziev U.N., Guro V.P., Sharipov Kh.T., Kayumov B.B., Niyazmatov A.A. Raw Materials for Modified Tungsten Carbide-Based Hard Alloys. *Chemical Journal of Kazakhstan.* 2022;1(77):37 – 48. (In Russ.).
11. Schalk N., Tkadletz M., Mitterer C. Hard coatings for cutting applications: Physical vs. chemical vapor deposition and future challenges for the coatings community. *Surface and Coatings Technology.* 2022;2(15): 429–441. <https://doi.org/10.1016/j.surco.2021.127949>
12. Noriega Flores M.H., Strokina I.V., Trofimova A.D. and others. Analysis of methods of modification of aluminum alloys. *Bulletin of the Siberian State Industrial University.* 2025;2(52):110–117. [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-110-117](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-110-117). EDN: TDWYFZ. (In Russ.).
13. Grigor'yants A.G., Shiganov I.N., Tret'yakov R.S., Misurov A.I., Asyutin R.D., Drenin A.A., Perestoroin A.V. Increasing the wear resistance of steel by laser surface modification with tungsten carbide. *Vestnik VNIZHT.* 2019;78(5):290–296. (In Russ.).
14. Kryuchkov P.M. Improvement of a hard alloy for drilling operations due to the use of vacuum sintering in combination with alloying with tantalum carbide. *Fizicheskaya mezomekhanika. Tekhnologii materialov.* 2002;20(4):117–121. (In Russ.).

REFERENCES

1. Klimov D.A., Myktybekov B., Nizovtsev V.E., Ukhov P.A. Prospects of application of nanostructured composite materials based on carbides and oxides of refractory metals for aerospace objects. In: *Proceedings of the MAI. Technology of materials.* 2011:1–8. (In Russ.).
2. Elizarova Yu.A., Zakharov A.I. High-temperature protective coatings for functional purposes. Scientific research and development. *Novye ogneupory.* 2020;(10):52–60. (In Russ.).
3. Hatamleh M. I., Mahadevan J., Malik A. Prediction of residual stress random fields for selective laser melted A357 aluminum alloy subjected to laser shock peening. *Journal of Manufacturing Science & Engineering.* 2019; 141(10):101011.
4. Sataeva N.E., Emelianenko K.A., Domantovsky A.G. Laser processing of aluminum alloys for creating weather-resistant superhydrophobic coatings. *Russian Nanotechnology.* 2020;15(2):158–163. (In Russ.).

15. Mariappan T. Recent developments of intumescent fire protection coatings for structural steel: A review. *Journal of Fire Sciences*. 2016;34(2):120–163.
16. Kumar S., Singh R., Singh T.P., Sethi B.L. Surface modification by electrical discharge machining: A review. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009;209(8):367–368.
17. Sytchenko A.D., Fatykhova M.N., Kuznetsov V.P., Kuptsov K.A., Petrzlik M.I., Kudryashov A.E., Kiryukhantsev-Korneev F.V. Tantalum carbide coatings obtained by magnetron sputtering and electric spark alloying to increase the wear resistance of door fittings. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya*. 2023;17(3):67–78. (In Russ.).
18. Kalyuzhnyi D.G., Palabugin M.V., Burnyshev I.N., Lys V.F., Lad'yanov V.I. Formation of a ceramic coating on the surface of aluminum alloy VAL10 during laser modification in a solution of polylicates. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya*. 2024;18(2):53–60. (In Russ.).
19. Kochanov G.P., Kostikov I.A., Kovalev I.A., Kannykin S.V., Shevtsov S.V., Konovalov A.A. Synthesis of refractory ceramics based on zirconium carbide by direct carbidization of zirconium. *VGTU. Neorganicheskie materialy*. 2023;59(2):202–207. (In Russ.).
20. Golikov A.YU., Golovin E.D., Savenko T.I., Kuznetsov V.A., Cherepanov A.N. Modification of aluminum alloys with finely dispersed refractory particles in order to improve their mechanical properties. *Izvestiya vuzov. Funktsional'nye pokrytiya*. 2021;303–304. (In Russ.).
21. Witkin D.B., Patel D.N., Helvajian H. Surface treatment of powder-bed fusion additive manufactured metals for improved fatigue life. *Journal of Material Engineering and Performance*. 2019;28:681–692.
22. Zeng, Yi, Dini Wang, Xiang Xiong. Ablation-resistant carbide Zr0, 8Ti0, 2C0, 74B0, 26 for oxidizing environments up to 3000 °C. *Nature Communications*. 2017;17(8):35–46.
23. Mariappan T. Recent developments of intumescent fire protection coatings for structural steel: A review. *Journal of Fire Sciences*. 2016;34(2):120–163.
24. Jinliang Z., Qingsong W., Dave B. A review of selective laser melting of aluminum alloys: Processing, microstructure, property and developing trends. *Journal of Materials Science & Technology*. 2019;35(2):270–284.
25. Panteleeva A.V., Nikonova R.M. Modification of aluminum with strengthening phases TiB_2 and TiC by the SHS method in a melt. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya*. 2019;21(1):65–69. (In Russ.).
26. Shiganov I.N., Samarin P.E. Surface modification of aluminum alloys by silicon carbides using laser melting. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Series: Mechanical Engineering*. 2012;5: 62–68. (In Russ.).
27. Olakanmi E.O., Cochrane R.F., Dalgarno K.W. A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties. *Progress in Materials Science*. 2015;74:401–477.
28. Pratik S., Subhasisa N., Guanjun W. Surface property modifications of silicon carbide ceramic following laser shock peening. *Journal of the European Ceramic Society*. 2017;37(9):302–308.
29. Luo H., Yazdi M. A., Chen S., Sun H., Gao F., Heintz O., Monteynard A., Sanchette F., Billard A. Structure, mechanical and tribological properties, and oxidation resistance of $TaC/a-C:H$ films deposited by high power impulse magnetron sputtering. *Ceramics International*. 2022;17(3):249–250.
30. Du S., Wen M., Yang L., Ren P., Meng Q., Zhang K., Zheng W. Structural, hardness and toughness evolution in Si-incorporated TaC films. *Ceramics International*. 2018;44(8):931–935.
31. Lurie S., Belov P., Solyaev Yu., Aifantis E.C. On one class of applied gradient models with simplified boundary problems. *Mater. Phys. Mech.* 2017;32(3):353–369.

Сведения об авторах:

Арина Денисовна Трофимова, лаборант УНИ, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: arinaatrva.053@mail.ru
ORCID: 0009-0008-5441-2381

Ирина Владимировна Строкина, к.т.н., доцент кафедры обработки металлов давлением ЕВРАЗ ЗСМК, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: strokina_iv@sibsiu.ru
ORCID: 0000-0003-3719-8949
SPIN-код: 3928-1409

Мария Хосе Нориега Флорес, аспирант кафедры обработки металлов давлением и материаловедения ЕВРАЗ ЗСМК, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: cereso13@hotmail.es
ORCID: 0009-0001-2475-1349

Виталий Сергеевич Маринич, лаборант УНИ, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: marinich_vs@mail.ru
ORCID: 0009-0000-5083-6226

E-mail: cereso13@hotmail.es
ORCID: 0009-0001-2475-1349

Information about the authors:
Arina D. Trofimova, UNI Laboratory Assistant, Siberian State Industrial University
E-mail: arinaatrvya.053@mail.ru
ORCID: 0009-0008-5441-2381

Vitaly S. Marinich, UNI Laboratory Assistant, Siberian State Industrial University
E-mail: marinich_vs@mail.ru
ORCID: 0009-0000-5083-6226

Irina V. Strokina, Cand. Sci., Associate Professor Department of Metal Forming EVRAZ ZSMK, Siberian State Industrial University
E-mail: strokina_iv@sibsiu.ru
ORCID: 0000-0003-3719-8949
SPIN-code: 3928-1409

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

Поступила в редакцию 10.11.2025
После доработки 01.12.2025
Принята к публикации 07.12.2025

Received 10.11.2025
Revised 01.12.2025
Accepted 07.12.2025

Maria J. Noriega Flores, Postgraduate student of the D Department of Metal Forming EVRAZ ZSMK, Siberian State Industrial University