

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-450-459>

УДК.621.793.74;621.373.826

Триботехнические характеристики композиционных покрытий на никелевой основе, полученных гибридными технологиями

Доктора техн. наук, профессора О. Г. Девойно¹⁾, Г. А. Туричин²⁾,
канд. техн. наук, доц. М. А. Кардаполова¹⁾,
инженеры Ю. И. Касач¹⁾, Е. В. Погудо¹⁾, И. М. Косякова¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
(Санкт-Петербург, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. Как объект изучения использованы покрытия, состоящие из самофлюсующихся сплавов на основе никеля или содержащие их композиции, сформированные в гибридном технологическом процессе с двумя основными стадиями: напылением плазменным методом и последующим оплавлением – газопламенным методом или за счет лазерного нагрева. Для полученных в данном процессе покрытий проведено экспериментальное определение их стойкости к абразивному износу в условиях граничного трения с вводом смазок. При этом изучено влияние состава покрытия и способа оплавления на величину износа, измеренного методом искусственных баз. Для оценочного определения динамики структурообразования в поверхностном слое, подвергнутом механическим нагрузкам при трении, использованы рентгенофазовый анализ, металлографический метод, а также сканирующая электронная микроскопия в режиме электронной дифракции (электронографии). После стадии лазерного оплавления удастся получить покрытия со стойкостью к износу, двукратно и более превосходящей уровень для напыленных покрытий того же состава, обработанных газопламенным методом. Износ поверхности покрытия, как было установлено, происходит по механизму усталостного разрушения наименее твердого компонента покрытия, т. е. никельсодержащей интерметаллидной фазы, с образованием островковой пленки из слабосвязанных с основой твердых кристаллитов карбидно-боридной фазы, что приводит в итоге к растрескиванию частиц этой фазы и осыпанию их с поверхности. Стойкость слоев, полученных после стадии лазерного оплавления, может быть повышена, по экспериментальным данным, путем уменьшения размеров зерна фаз в покрытии и его текстурирования, а также повышения концентрации легирующих элементов в составе металлсодержащей связующей фазы покрытия. Введение легирующих добавок приводит к дополнительно увеличению износостойкости в 2–4 раза. Это связано, в зависимости от типа добавок, с увеличением количества упрочняющей фазы при сохранении пластичности матрицы (покрытия с добавками карбида хрома), степени легирования никелевой матрицы (добавки карбида вольфрама и карбида бора), а также наличием мелкодисперсного карбидно-боридного компонента, что уменьшает процессы деформирования и царапания.

Ключевые слова: износостойкость, плазменное напыление, лазерное оплавление, лазерное легирование, трибологические свойства, упрочнение, покрытие, фазовый состав, самофлюсующиеся сплавы, гибридные технологии

Для цитирования: Триботехнические характеристики композиционных покрытий на никелевой основе, полученных гибридными технологиями / О. Г. Девойно [и др.] // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 6. С. 450–459. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-450-459>

Адрес для переписки

Девойно Олег Георгиевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Б. Хмельницкого, 9,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 331-00-45
plazteh@bntu.by

Address for correspondence

Devoino Oleg G.
Belarusian National Technical University
9, B. Hmelnitzkogo str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Тел.: +375 17 331-00-45
plazteh@bntu.by

Tribotechnical Characteristics of Nickel-Based Composite Coatings Obtained by Hybrid Technologies

O. G. Devoino¹⁾, G. A. Turichin²⁾, M. A. Kardapolava¹⁾, Y. I. Kasach¹⁾, E. V. Pogudo¹⁾, I. M. Kasyakova¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾St. Petersburg Marine Technical University (St. Petersburg, Russian Federation)

Abstract. As an object of this study, the coatings were used, which are composed of self-fluxing nickel-based alloys or compositions containing them, formed in a hybrid technological process with two main stages: spraying by the plasma method and subsequent remelting – by the gas-flame method or laser heating. An experimental measurement of their resistance to abrasive wear under conditions of boundary friction with the introduction of lubricants has been carried out for the coatings obtained in this process. At the same time, the influence of the coating composition and the remelting method on the wear value measured by the artificial base method has been investigated. To evaluate the dynamics of structure formation in the surface layer subjected to mechanical loads during the friction, X-ray diffraction analysis, metallographic method, and scanning electron microscopy in the electron diffraction mode have been used. After the laser remelting stage, it is possible to obtain coatings with wear resistance that is twice or more superior to the level for sprayed coatings of the same composition processed by the gas flame method. Wear of the coating surface has been found to occur through the mechanism of fatigue failure of the least hard component of the coating, i. e., the nickel-containing intermetallic phase, with the formation of an island-type film of hard crystallites of the carbide-boron phase weakly bound to the coating base, which ultimately leads to cracking of particles of this phase and their crumbling from the surface. The durability of layers obtained after the laser remelting stage can be increased, according to experimental data, by reducing the grain size of the phases in the coating and its texturing, as well as increasing the concentration of alloying elements in the composition of the metal-containing binder phase of the coating. The use of alloying additives leads to an additional increase in wear resistance by 2–4 times. This is due, depending on the type of additives, with an increase in the amount of the hardening phase while maintaining the plasticity of the matrix (coatings with chromium carbide additives), the degree of alloying of the nickel matrix (by the tungsten carbide and boron carbide additives), as well as the presence of a finely dispersed carbide-boride component, which reduces the processes of deformation and scratching.

Keywords: wear resistance, plasma spraying, laser remelting, laser alloying, tribological properties, hardening, coating, phase composition, self-fluxing alloys, hybrid technologies

For citation: Devoino O. G., Turichin G. A., Kardapolava M. A., Kasach Y. I., Pogudo E. V., Kasyakova I. M. (2023) Tribotechnical Characteristics of Nickel-Based Composite Coatings Obtained by Hybrid Technologies. *Science and Technique*. 22 (6), 450–459. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-450-459> (in Russian)

Введение

В настоящее время существенно повышаются требования к материалам, применяемым для производства деталей. Причиной этого является ужесточение условий эксплуатации многих видов современного оборудования. Особую актуальность данная задача приобретает для поверхностей, работающих в условиях трения. Поэтому для ее решения требуется сформировать на поверхности детали слои, у которых уровень эксплуатационных свойств будет значительно выше свойств основного металла, а главным критерием качества при разработке материалов с высокими триботехническими характеристиками является высокая износостойкость [1]. К наиболее технологичным и экономически приемлемым современным материалам, используемым в технологиях упрочнения и восстановления поверхности узлов и деталей различных машин, в частности предназначенных для эксплуатации в режимах интен-

сивного трения и абразивного износа, относятся никельсодержащие сплавы типа ПГ-12Н-01. В литературе описан ряд методов газотермического нанесения покрытий из подобных самофлюсующихся никельсодержащих сплавов (которые разрабатывались в значительной степени для технологий восстановления пар трения в деталях машиностроительного производства) и процессов их оплавления [2–4]. Установлено, что варьированием режимами оплавления покрытий и составом легирующих компонентов достигается значительное изменение структуры и свойств покрытий [5–11].

В настоящее время интенсивно развиваются гибридные методы модификации поверхностей, позволяющие совместить преимущества отдельных процессов, а также значительно расширить технологические возможности классических методов упрочнения. В работах [12–13] показаны преимущества одновременного применения гибридных технологий локальной термической обработки: лазерно-дуговых, ла-

зерно-плазменных, лазерно-индукционных, лазерно-электроискровых.

Однако получение покрытий с прогнозируемым комплексом эксплуатационных свойств требует уяснения связи особенностей структурных характеристик покрытий с их эксплуатационными свойствами и механизма процесса изнашивания.

Процесс изнашивания деталей машин, как известно, определяется большим количеством факторов. В качестве цели данного исследования нами принято определение возможности регулирования микроструктуры в ходе газотермической технологии восстановления поверхностей, а также их физико-механических параметров за счет ввода дополнительных легирующих добавок и оптимизации условий лазерного (или газопламенного) оплавления. С учетом этого к факторам, способным обеспечить высокую эффективность данной оптимизации для улучшения параметров качества поверхности, можно отнести физико-механические свойства поверхностных слоев и характеристики их микрогеометрии. Влияние этих факторов на износостойкость с достаточной степенью достоверности может быть изучено с помощью лабораторных испытаний.

Методика экспериментального исследования

В качестве опытных образцов были выбраны пластины из конструкционной стали марки Сталь 45. В ходе исследования на них напылялись покрытия толщиной от 0,6 до 0,7 мм из двух видов промышленных порошковых материалов: 1) порошка самофлюсующегося сплава на основе никеля ПГ-12Н-01; 2) трех механически перемешанных смесей (включающих: 80 мас. % сплава ПГ-12Н-01; 20 % легирующего карбидного порошка (в трех вариантах – WC, Cr₃C₂, В₄C)). Напыление проводили с использованием установки плазменного напыления УПУ-3Д с электродуговым плазмотроном ПП-25 мощностью до 35 кВт. Образцы напыленных покрытий из указанных порошков далее оплавливались по двум вариантам: 1) газопламенным методом с использованием резака типа Р1-03П с внутренним смешением топлива и окислителя; 2) лазерным методом

на установке «Комета-2» с максимальной электрической мощностью 1000 Вт. В результате данной дополнительной термообработки достигалось повышение величины адгезии напыленного покрытия к металлической основе и снижение его пористости. При выполнении лазерного оплавления покрытия линейная скорость сканирования пучка излучения составляла 0,5–3,3 мм/с при радиусе сфокусированного луча от 0,5 до 1,5 мм.

В качестве среды при проведении сравнительных лабораторных испытаний использовали масло «Индустриальное 20» с небольшими добавками абразива. Данный выбор среды для исследований обусловлен тем, что большинство деталей работает в условиях граничного трения в присутствии абразива. Для оценки структурных превращений, происходящих в процессе трения в поверхностных слоях, проводили металлографические и рентгено-дифракционные исследования. При этом для рентгенофазового анализа нами применялся стандартный лабораторный дифрактометр марки «Дрон-3,0» с использованием в нем анода, генерирующего пучок CuK α -излучения с длиной волны $\lambda = 0,15418$ нм. Скорость сканирования излучения относительно поверхности анализируемого образца с газотермическим покрытием задавалась как один градус (угла 2θ) в минуту.

Состояние поверхностей трения для изучаемых покрытий определялось электронографическим методом на сканирующем электронном микроскопе Geols. Для проведения исследования микроструктуры поверхности покрытий их предварительно подвергали электрохимическому травлению в растворе, содержащем 5 % HCl и 10 % C₃H₅(OH)₃ + CH₃OH, при плотности постоянного тока 50 мА/мм². Были выполнены также физико-механические испытания полученных образцов газотермических покрытий для определения их износостойкости с помощью лабораторной установки СМТ-1, работавшей в режиме машины трения по схеме «диск – колодка». Интенсивность износа в ходе процесса трения определялась по методу искусственных баз, при этом как база использовалась эталонная канавка глубиной 100 мкм (сделанная на поверхности покрытия механической обработкой). В ходе измерений как образцы применялись специальные диски радиу-

сом 2,5 см (эскиз на рис. 1), имевшие осевое отверстие. Интенсивность износа поверхности покрытия определена путем сравнения значений глубины канавки в нем до и после механического воздействия/трения. При этом использовалось по пять отдельных помеченных точек вдоль канавки в покрытии, регистрацию значений глубины вели с помощью лабораторного профилографа-профилометра модели 252.

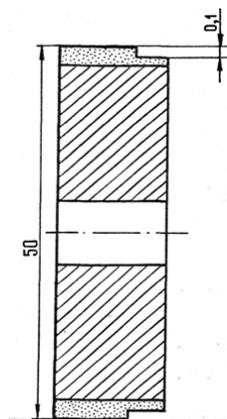


Рис. 1. Образец для исследования износостойкости на машине трения СМТ-1

Fig. 1. Sample for testing wear resistance on a friction machine СМТ-1

Результаты исследования

Полученные результаты сравнительной износостойкости покрытий с различными способами оплавления и составами покрытий представлены в табл. 1.

Анализ измеренных значений интенсивности износа позволил выявить тот факт, что дополнительное легирование карбидными добавками в процессе получения газотермических покрытий из порошков никельсодержащего сплава обеспечивает после операции их оплавления (лазерным или газопламенным методом) улучшенные показатели по износостойкости поверхности по сравнению с эталонным образ-

цом напыленного покрытия из такого же самофлюсующегося сплава ПГ-12Н-01, но не легированного карбидами. При этом износостойкость покрытий после лазерного оплавления выше износостойкости покрытий, оплавленных газопламенной горелкой. Существенно, что при реализации первого из этих двух вариантов оплавления большая относительная износостойкость итогового покрытия достигается в режиме с вводом легирующего порошка Cr_3C_2 , в то время как при газопламенном оплавлении более эффективно использование покрытия, легированного другим карбидом – V_4C . Это может быть объяснено тем, что при лазерном нагреве происходит перегрев покрытия, ведущий к разложению некоторых структурных составляющих, обуславливающих повышенную износостойкость.

Сравнение различных способов оплавления показывает, что более высокой износостойкостью обладают покрытия, подвергнутые оплавлению лучом лазера, причем, вероятно, за счет достижения в ходе лазерной обработки высоких скоростей нагрева и охлаждения, приводящих к значительному измельчению кристаллитов в структуре покрытия. В покрытиях, сформированных с использованием стадии нагрева напыленного слоя лазерным лучом, как правило, достигается образование твердого раствора с повышенной концентрацией легирующей добавки, что создает предпосылки для существенного возрастания дефектности кристаллической структуры (в том числе содержания в ней дислокаций) и образования локальных зон с повышенными упругими микронапряжениями кристаллической решетки.

Таблица 1

Результаты испытаний износостойкости упрочненных поверхностей

Results of wear resistance tests of hardened surfaces

Состав покрытия	Способ оплавления	Величина износа, мкм	Относительная износостойкость
ПГ-12Н-01	Оплавление газопламенным методом	25	1
Смесь ПГ-12Н-01 + 20 % V_4C		8,1	3,08
Смесь ПГ-12Н-01 + 20 % Cr_3C_2		9,1	2,76
Смесь ПГ-12Н-01 + 20 % WC		11,6	2,15
ПГ-12Н-01	Оплавление излучением лазера	15,8	1,58
Смесь ПГ-12Н-01 + 20 % V_4C		6,7	3,73
Смесь ПГ-12Н-01 + 20 % Cr_3C_2		4,1	6,09
Смесь ПГ-12Н-01 + 20 % WC		8,3	3,01

Такой эффект часто приводит к определенной деформации решетки, дающей эффект упрочнения материала в поверхностном оплавленном слое. Результаты исследований указывают на то, что процесс износа покрытия включает в себя усталостное разрушение менее твердой составляющей – интерметаллидной фазы на основе нике-

ля – и последующее обнажение зерен более твердых карбидно-боридных фаз с образованием фактически «островковой пленки» на поверхности, с ее дальнейшим выкрашиванием и осыпанием.

Электроннографическое строение поверхностей после проведения испытаний на изнашивание представлено на рис. 2–5.

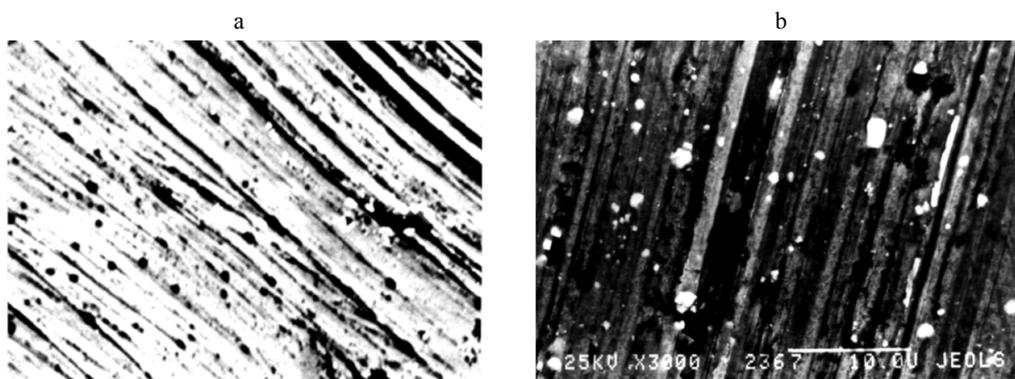


Рис. 2. Поверхность сплава ПГ-12Н-01 после изнашивания, $\times 3000$: а – оплавление горелкой; б – лучом лазера
 Fig. 2. Surface of ПГ-12Н-01 [PG-12N-01] alloy after wear, $\times 3000$: а – reflow with a burner; б – reflow with a laser beam

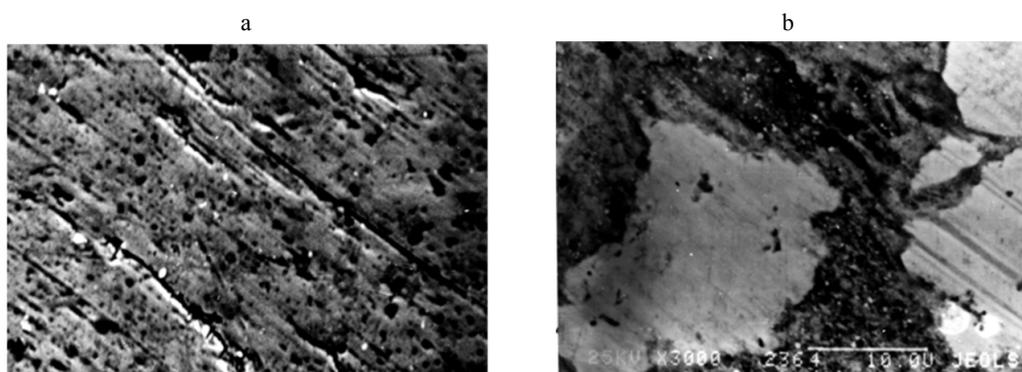


Рис. 3. Поверхность сплава ПГ-12Н-01 + 20 % WC после изнашивания, $\times 3000$: а – оплавление горелкой; б – лучом лазера
 Fig. 3. Surface of ПГ-12Н-01 [PG-12N-01] alloy + 20 % WC after wear, $\times 3000$: а – reflow with a burner; б – reflow with a laser beam

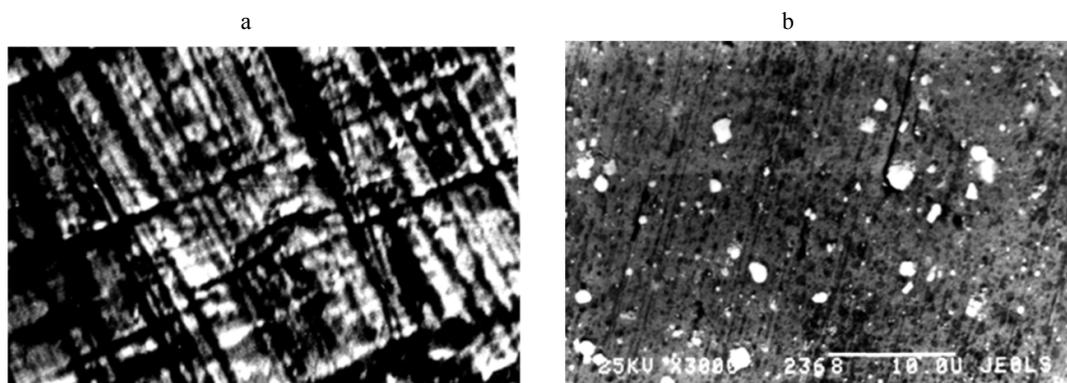


Рис. 4. Поверхность сплава ПГ-12Н-01 + 20 % Cr₃C₂ после изнашивания, $\times 3000$: а – оплавление горелкой; б – лучом лазера
 Fig. 4. Surface of ПГ-12Н-01 [PG-12N-01] alloy + 20 % Cr₃C₂ after wear, $\times 3000$: а – reflow with a burner; б – reflow with a laser beam



Рис. 5. Поверхность сплава ПГ-12Н-01 + 20 % В₄С после изнашивания, ×3000:
а – оплавление горелкой; б – лучом лазера

Fig. 5. Surface of ПГ-12Н-01 [PG-12N-01] + 20 % В₄С-addition after wear period, ×3000:
а – reflow with a burner; б – reflow with a laser beam

Представленные на рисунках экспериментальные данные демонстрируют эффект получения наименьшей стойкости поверхности к трению при использовании оплавленных покрытий, напыленных из нелегированных карбидами порошков самофлюсующегося сплава. При этом достигается достаточно быстрый износ поверхности, регистрируемый по наличию характерной пластической деформации покрытия и образованию большого числа царапин, а также возникает выработка Ni-содержащей матричной фазы. В результате наблюдаются селективное разрушение и осыпание с поверхности зерен высокотвердой карбидо-боридной фазы.

Для случая образцов покрытий, полученных в режиме лазерного оплавления, наблюдается интенсификация упругого отеснения материала в ходе абразивного износа покрытия, по-видимому, обусловленная двумя причинами: а) тем, что Ni-содержащая матричная фаза имеет повышенную степень пересыщения, так как она сформировалась в покрытии после оплавления в достаточно кинетически неравновесных условиях (в отличие от менее скоростных по температуре режимов газопламенного оплавления); б) тем, что фаза, содержащая твердую карбидную добавку, характеризуется меньшей дисперсностью по сравнению с дисперсностью аналогичной фазы в образцах того же интегрального химического состава, полученных по технологии со стадией оплавления газовой горелкой.

Результаты определения фазового состава и составов фаз покрытий при плазменном на-

пылении на Сталь 45 с последующим оплавлением лазерным излучением приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты рентгеновских исследований сплава ПГ-12Н-01 с композиционными добавками
Results of X-ray studies of ПГ-12Н-01 [PG-12N-01] alloy with composite additives

	Фаза в покрытии	Содержание, %	Вероятная примесь	Концентрация примеси или состав фазы
Сплав ПГ-12Н-01	Ni	56	Fe	7,5 % ат. Fe
	Ni ₂ B	8	Дефицит В	Ni ₂ B _{0,9995}
	Ni ₃ B	25	Cr	(Ni ₈₅ Cr ₁₅) ₃ B
	Cr ₂ B	11	Si	Cr ₂ (B ₉₇ Si ₃)
Смесь ПГ-12Н-01 + 20 % В ₄ С	Ni	51	В	0,4 % ат. В
	Ni ₃ B	10	Cr	(Ni ₉₇ Cr ₃) ₃ B
	Cr ₂ B	9	Si	Cr ₂ (B ₉₉ Si ₁)
	В	14	Нет	Бор
	В ₄ С	16	Дефицит В	В ₄ С _{0,9996}
Смесь ПГ-12Н-01 + 20 % Cr ₃ С ₂	Ni	46	Cr	5% ат. Cr
	Ni ₃ B	30	Cr	(Ni ₉₇ Cr ₃) ₃ B
	Ni ₄ B ₃	7	Fe	Ni ₄ B _{2,9958}
	Cr ₂ B	16	С	(Cr ₈₆ Fe ₁₄) ₂ B
	В	1	С	0,5% ат. С
Смесь ПГ-12Н-01 + 20 % WС	Ni	16	W	3% ат. W
	Ni ₃ B	37	Дефицит В	Ni ₃ B _{0,97}
	Ni ₂ B	8	Нет	Ni ₂ B
	NiB	6	Нет	NiB
	Ni ₄ B ₃	13.5	Дефицит В	Ni ₄ B _{2,97}
	W ₂ С	16	В	W ₂ (C ₉₁ B ₆)
	Cr ₃ С ₂	3.5	Дефицит С	Cr ₃ С _{1,96}

Как было отмечено выше, введение апробированных нами карбидных легирующих добавок в напыляемые покрытия обеспечивает получение после их оплавления эффекта упрочнения никельсодержащей интерметаллидной матрицы и повышенного содержания упрочняющей карбидной фазы. Такой эффект проявляется в параметрах структуры поверхности, подвергнутой испытаниям на износостойкость, в частности для случая испытания покрытия, полученного с добавками WC и V_4C_3 , царапины на поверхности (после испытаний покрытия на трение) почти отсутствуют. Анализируемые поверхности трения образцов характеризуются наличием упругого оттеснения материала покрытия, за исключением случая образца покрытия, сформированного при напылении порошковой смеси, легированной карбидом хрома. Это может быть причиной того, что такие добавки не приводят к упрочнению твердого раствора за счет его легирования, так как хром является сильно карбидообразующим элементом и нахождение его в твердом растворе имеет низкую термодинамическую вероятность. Матрица в этом случае остается более пластичной, и внедрение неровностей контртела при трении приводит к образованию царапин. Однако немалую роль играют и окислительные процессы. Вторичные окисные пленки, возникающие в результате мгновенных температурных вспышек при контактировании микронеровностей и воздействии с окружающей средой, образуют пассивную пленку на поверхностях трения. Прочность и фрикционные свойства таких пленок во многом определяют характер протекания износа. Различные добавки оказывают значительное влияние на этот процесс. Отсутствие узлов схватывания на поверхности трения покрытия с добавками карбида бора свидетельствует о высоких фрикционных свойствах такой поверхности, что в немалой степени связано и с высокой смазывающей способностью пленок, обогащенных бором.

Следует также отметить, что, согласно экспериментальным данным, у покрытий, полученных как с лазерным, так и с газопламенным оплавлением, в определенной степени меняется структура изношенной поверхности. Так, для образцов, полученных с лазерной обработкой, после испытаний почти не наблюдается цара-

пин, тогда как поверхности, оплавленные горелкой, имеют отчетливые следы царапания. Вероятными причинами этого являются повышенная гомогенность распределения частиц упрочняющей карбидной фазы в интерметаллидной Ni-содержащей матрице (при этом она имеет повышенную прочность за счет легирования твердого раствора) и пониженная дисперсность кристаллитов в структуре покрытия за счет большой интенсивности кристаллизации при остывании его после лазерного оплавления.

В ходе исследования образцов, полученных в режиме лазерного оплавления покрытия, легированного карбидными добавками, выявлено, что на поверхностях, подвергнутых трению, имеются отдельные крупнодисперсные карбидные включения. По составу они идентифицированы как первичные карбиды, не успевшие из-за диффузионных ограничений раствориться и войти в состав матричной фазы покрытия при его высокоскоростном остывании после окончания оплавления. Они отличаются от вторичных карбидных фаз, имеющих в остальном сплаве и образовавшихся после кристаллизации из расплава в пятне лазерного нагрева покрытия. Также зафиксировано на части поверхности покрытия выкрашивание крупных частиц, что обусловлено, вероятно, охрупчиванием зон, окружающих зерна карбидных фаз в покрытии. Однако в целом анализ поверхностей износа свидетельствует о том, что оплавление лазерным лучом обеспечивает более нормальное протекание износа, чем в случае оплавления газовой горелкой.

Рентгенофазовый анализ показал, что в изучаемых покрытиях, полученных из порошка базового самофлюсующегося сплава без его легирования, после их испытаний на трение не наблюдается явных фазовых повреждений в приповерхностных слоях. Для образцов покрытий, сформированных с использованием как одного, так и другого использованных нами способов оплавления, установлено, что после испытаний на трение практически не меняются как параметры элементарной кристаллической ячейки фазы на основе никеля, так и дисперсность зерен данной фазы. Таким образом, с высокой вероятностью для данных образцов можно предположить механизм выцарапывания

продуктами износа мягкой матричной фазы (содержащей γ -твердый раствор на основе никеля и легирующих элементов). Характерная для данного процесса на микроуровне степень пластического передеформирования достаточно мала. В композиционном материале с добавками карбида бора исходная структура после лазерного и газопламенного оплавления различна. Дифрактограммы, измеренные для образцов покрытий такого состава, полученных с лазерным оплавлением, демонстрируют уменьшение интенсивности линий боридной фазы Ni_3B , а также линий дополнительной фазы карбида V_4C . На основании этого можно заключить, что фаза карбида соответствует частицам остаточного (первичного) порошка V_4C , который вводился как лигатура при формировании покрытия и не полностью растворился в расплаве в условиях лазерного оплавления покрытия. В ходе данного оплавления, по-видимому, происходит достаточно сильное искажение параметров элементарной кристаллической ячейки Ni-содержащей фазы за счет легированности твердого раствора примесью бора (в концентрации до 0,4 ат. %), образующего раствор внедрения в кристаллической решетке. При газопламенном оплавлении фаза V_4C отсутствует полностью, что связано с длительным нахождением карбида в расплаве. В процессе перекристаллизации дополнительное количество бора и углерода расходуется на образование более устойчивых соединений, таких как Ni_3B , Cr_2B и, предположительно, Cr_7O_3 . Параметры решетки никеля у оплавленного газовой горелкой покрытия практически не изменяются и примерно соответствуют параметрам решетки чистого никеля. В процессе изнашивания происходит уменьшение размеров кристаллитов от 13,8 до 10,0 нм у оплавленного лазерным излучением слоя и от 51,1 до 27,6 нм в случае газопламенного оплавления. У оплавленных лазерным излучением образцов наблюдается некоторое снижение степени искажения решетки.

Полученные данные свидетельствуют о том, что износ покрытий с добавками карбида бора сопровождается пластическим передеформированием с выцарапыванием никелевой матрицы в случае газопламенного оплавления. Экспериментальные же результаты для случая покры-

тий, полученных с лазерным оплавлением, указывают на достижение эффекта упрочнения Ni-содержащей интерметаллидной фазы, снижающего как износ за счет царапания, так и степень пластического передеформирования структуры. На уменьшение интенсивности износа данных покрытий влияет также явление возникновения (благодаря повышенной концентрации бора в никельсодержащей матрице и других соединениях) вторичных кристаллических структур, содержащих V_2O_3 , с твердосмазочными свойствами. Структурные исследования покрытий с добавками карбида хрома показали наличие линий этой фазы высокой интенсивности в образцах, оплавленных газопламенной горелкой. В слоях, оплавленных лазерным излучением, наблюдается значительное снижение интенсивности этих линий вплоть до полного их вырождения. Интересным является тот факт, что растворение карбида хрома не приводит к значительному увеличению легированности никелевой матрицы. Согласно проведенным расчетам, в никелевой матрице растворяется при лазерном оплавлении только 5 % ат. хрома. Вследствие этого никелевая матрица сохраняет высокую пластичность. Растворившийся карбид хрома легирует борид никеля, образуя соединение следующего стехиометрического состава $(\text{Ni}_{97}\text{Cr}_3)_3$ и дополнительное количество боридов хрома Cr_2B , легированных железом. То есть в этом случае происходит рост количества упрочняющей фазы, а также ее упрочнение за счет образования легированных боридов Ni_3B , входящих в состав легкоплавкой эвтектики. Такое строение сплава обуславливает и специфический для данного состава характер износа. Мягкая матрица подвергается многократному пластическому передеформированию с образованием царапин продуктами износа. О сильном передеформировании мягкой матрицы свидетельствует значительное измельчение размеров кристаллитов: с 55,5 до 22,3 нм – в случае газопламенного оплавления, с 35,2 до 22,1 нм – при лазерном оплавлении. Значительное повышение износостойкости обусловлено увеличением количества упрочняющей фазы, частицы которой тормозят развитие усталостных процессов в никелевой матрице. Кроме того, все твердые составляющие такого композиционного покры-

тия имеют полную смачиваемость расплавом никеля, что обуславливает максимальное их сцепление с никелевой матрицей и стойкость к выкрашиванию.

При введении легирующих добавок карбида вольфрама в структуре происходит сильное упрочнение матрицы за счет частичного растворения в никеле вольфрама (до 7 % ат.). В процессе изнашивания покрытия такого состава на поверхности не наблюдалось задиrow и царапин. При этом не было зафиксировано измельчения кристаллитов, а также скольконибудь значительного изменения параметров решетки, что свидетельствует о локализации процессов пластического поверхностного деформирования в тончайших, рентгеновски нечувствительных слоях. По-видимому, основным механизмом изнашивания в этом случае является усталостное выкрашивание твердой фазы.

ВЫВОДЫ

1. В ходе экспериментального определения влияния оптимизации параметров гибридного процесса формирования газотермических самофлюсующихся покрытий на основе Ni-содержащих сплавов были установлены новые закономерности структурообразования в формируемом поверхностном слое и его поведении при последующих испытаниях на абразивный износ.

2. Результаты этих испытаний указывают на зависимость механизма износа от микроструктуры образованной упрочненной поверхности, определяемой типом и режимом технологической стадии оплавления (лазерного или газопламенного), а также составом вводимой в покрытие легирующей карбидной добавки.

3. Измерение свойств покрытий, легированных карбидной примесью Cr_3C_2 , показало рост концентрации упрочняющей фазы в покрытии при обеспечении достаточной пластичности Ni-содержащей матричной фазы, за счет чего достигается повышение механической прочности покрытия в условиях его испытаний на трение. Это приводит также к особому механизму изнашивания покрытия. Введение же в покрытие иных легирующих добавок – из карбидных порошков WC и W_4C – позволяет

получить значительный эффект, регистрируемый по повышению прочностных характеристик Ni-содержащей матричной фазы покрытия (без изменения объемного содержания данной фазы), за счет этого защищающий ее от механической деформации и образования трещин и царапин.

4. Установлено, что покрытия, оплавленные лазерным излучением, обладают в 2–3 раза более высокой износостойкостью по сравнению с покрытиями того же состава, оплавленными газовой горелкой. При этом за счет оплавления с помощью лазерного метода в полученных покрытиях зафиксирован эффект улучшения их стойкости в условиях износа при испытаниях на трение, обусловленный механизмом снижения размеров кристаллитов фаз в поверхностном слое и изменения его текстуры, а также дополнительного внедрения легирующих компонентов в матричной фазе покрытия.

Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы «Передовые цифровые технологии» (Соглашение о гранте № 075-15-2022-312 от 20.04.2022).

ЛИТЕРАТУРА

1. Пантелеенко, Ф. И. Восстановление деталей машин / Ф. И. Пантелеенко, В. П. Лялякин, В. П. Иванов. М.: Машиностроение, 2003. 672 с.
2. Кудинов, В. В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование / В. В. Кудинов, Г. В. Бобров. М.: Металлургия, 1992. 432 с.
3. Балдаев, Л. Х. Газотермическое напыление: учеб. пособие / Л. Х. Балдаев, В. А. Вахалин, Г. И. Ганноченко. М.: Маркет ДС, 2007. 344 с.
4. Спиридонов, Н. В. Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин / Н. В. Спиридонов, О. С. Кобяков, И. Л. Куприянов. Минск: Выш. шк., 1988. 155 с.
5. Wear Behaviour of Laser Clad NiCrBSi Coating / E. Fernández [et al.] // *Wear*. 2005. Vol. 259, iss. 7–12. P. 870–875. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.02.063>.
6. Comparison of laser-Clad and Furnace-Melted Ni-Based Alloy Microstructures / Q. Li [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. 2001. Vol. 137, iss. 2–3. P. 122–135. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(00\)00732-5](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(00)00732-5).
7. Simunovic, K. Different Approaches to the Investigation and Testing of the Ni-Based Self-Fluxing Alloy Coatings – A Review. Part 2: Microstructure, Adhesive Strength, Cracking Behavior, and Residual Stresses Investigations / K. Simunovic, T. Saric, G. Simunovic // *Tribo-*

- logy Transactions. 2014. Vol. 57, iss. 6. P. 980–1000. <https://doi.org/10.1080/10402004.2014.927548>.
8. Simunovic, K. Different Approaches to the Investigation and Testing of the Ni-Based Self-Fluxing Alloy Coatings – A Review. Part 1: General Facts, Wear and Corrosion Investigations / K. Simunovic, T. Saric, G. Simunovic // *Tribology Transactions*. 2014. Vol. 57, iss. 6. P. 955–979. <https://doi.org/10.1080/10402004.2014.927547>.
 9. Hemmati, I. Compositional Modification of Ni-Base Alloys for Laser-Deposition Technologies / I. Hemmati, V. Ocelik, J. Th. M. De Hosson // *Laser Surface Engineering. Processes and Applications*. 2014. P. 137–162. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-074-3.00006-4>.
 10. Соболева, Н. Н. Повышение износостойкости NiCrBSi покрытий, формируемых газопорошковой лазерной наплавкой: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.09 / Н. Н. Соболева. Екатеринбург. 2016. 190 с.
 11. Investigation of Ni-Cr-Si-Fe-B Coatings Produced by the Electron Beam Cladding Technique / T. A. Zimogliadova [et al.] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 156, No 1. P. 012017. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/156/1/012017>.
 12. Григорьянц, А. Г. Гибридные технологии лазерной сварки: учеб. пособие / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. М. Чирков. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 52 с.
 13. Литвинов, А. П. Направления развития комбинированных и гибридных технологий сварки и наплавки / А. П. Литвинов // *Автоматическая сварка*. 2009. № 1. С. 48–52.
- Поступила 10.01.2023
Подписана в печать 19.09.2023
Опубликована онлайн 30.11.2023
- ЛИТЕРАТУРА
1. Panteleenko F. I., Lyalyakin V. P., Ivanov V. P. (2003) *Restoration of Machine Parts*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 672 (in Russian).
 2. Kudinov V. V., Bobrov G. V. (1992) *Spray Coating. Theory, Technology and Equipment*. Moscow, Metallurgiya Publ. 432 (in Russian).
 3. Baldaev L. Kh., Vakhalin V. A., Gannochenko G. I. (2007) *Gas Thermal Spraying*. Moscow, Market DS Publ. 344 (in Russian).
 4. Spiridonov N. V., Kobayakov O. S., Kupriyanov I. L. (1988) *Plasma and Laser Methods for Hardening Machine Parts*. Minsk, Vysshaya Shkola Publ. 155 (in Russian).
 5. Fernández E., Cadenas M., González R., Navas C., Fernández R., De Damborenea J. (2005) Wear Behaviour of Laser Clad NiCrBSi Coating. *Wear*, 259 (7–12), 870–875. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.02.063>.
 6. Li Q., Zhang D., Lei T., Chen C., Chen W. (2001) Comparison of Laser-Clad and Furnace-Melted Ni-Based Alloy Microstructures. *Surface and Coatings Technology*, 137 (2–3), 122–135. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(00\)00732-5](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(00)00732-5).
 7. Simunovic K., Saric T., Simunovic G. (2014) Different Approaches to the Investigation and Testing of the Ni-Based Self-Fluxing Alloy Coatings – A Review. Part 2: Microstructure, Adhesive Strength, Cracking Behavior, and Residual Stresses Investigations. *Tribology Transactions*, 57 (6), 980–1000. <https://doi.org/10.1080/10402004.2014.927548>.
 8. Simunovic K., Saric T., Simunovic G. (2014) Different Approaches to the Investigation and Testing of the Ni-Based Self-Fluxing Alloy Coatings – A Review. Part 1: General Facts, Wear and Corrosion Investigations. *Tribology Transactions*, 57 (6), 955–979. <https://doi.org/10.1080/10402004.2014.927547>.
 9. Hemmati I., Ocelik V., De Hosson J. Th. M. (2014) Compositional modification of Ni-Base Alloys For Laser-Deposition Technologies. *Laser Surface Engineering Processes and Applications*, 137–162. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-074-3.00006-4>.
 10. Soboleva N. N. (2016) *Increasing the Wear Resistance of NiCrBSi Coatings Formed by Gas-Powder Laser Cladding*: Dissertation of the Candidate of Technical Sciences. Ekaterinburg. 190 (in Russian).
 11. Zimogliadova T. A., Drobyaz E. A., Golkovskii M. G., Bataev V. A., Durakov V. G., Cherkasova N. Y. (2016) Investigation of Ni-Cr-Si-Fe-B Coatings Produced by the Electron Beam Cladding Technique. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 156 (1), 012017. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/156/1/012017>.
 12. Grigoryants, A. G., Shiganov I. N., Chirkov A. M. (2004) *Hybrid Laser Welding Technologies*. Moscow, Publishing House of Bauman Moscow State Technical University. 52 (in Russian).
 13. Litvinov A. P. (2009) Directions for the Development of Combined and Hybrid Welding and Surfacing Technologies. *Avtomaticheskaya Svarka = Automatic Welding*, (1), 48–52 (in Russian).
- Received: 10.01.2023
Accepted: 19.09.2023
Published online: 30.11.2023