

УДК 621.793.74, 621.763

<https://doi.org/10.37890/jwt.vi69.179>

## **Оценка износостойкости и триботехнических свойств плазменных покрытий**

**А. О. Токарев<sup>1</sup>**

*ORCID: 0000-0002-2841-3689*

**Л. Д. Макагон<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Сибирский государственный университет водного транспорта, Новосибирск, Россия*

**Аннотация.** С целью объективной оценки эффективности внедрения новых материалов и технологий восстановления изношенных поверхностей деталей машин проведены испытания защитных плазменно напылённых покрытий в условиях циклического контактного импульсного нагружения и в условиях жидкостного трения скольжения.

Материалом покрытий служили интерметаллидные Ni-Al и Ni-Ti порошковые сплавы, а также сплав ПР-НХ16СРЗ, упрочнённый твёрдыми карборидными фазами.

Испытания, проведённые на лабораторных стендах и в реальных условиях эксплуатации, показали, что нанесение защитных покрытий с использованием плазматрона с кольцевой инжекцией порошка позволяет исключить из технологического процесса дополнительную термическую обработку покрытий.

Лучшие результаты при всех видах испытания выявлены при испытании покрытия, напылённого интерметаллидным Ni-Al сплавом.

Износостойкое покрытие, напылённое самофлюсующимся сплавом ПР-НХ16СРЗ, существенно ухудшает условия трения скольжения, вследствие чего для восстановления поверхностей деталей, работающих в парах трения скольжения, его применение не рекомендуется без оплавления дополнительной термической обработки.

**Ключевые слова:** Плазменное напыление, износостойкие покрытия, порошковые сплавы, лабораторные испытания, износостойкость, контактно-импульсные нагрузки.

## **Assessment of tribotechnical properties and resistance to wear of plasma coatings**

**Alexander O. Tokarev<sup>1</sup>**

*ORCID: 0000-0002-2841-3689*

**Lyubov D. Makagon<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russia*

**Abstract.** For the purpose of objective assessment of the effectiveness of the introduction of new materials and technologies for the restoration of worn surfaces of machine parts, tests of protective plasma spray coatings were carried out under the conditions of cyclic contact pulse loading and under the conditions of liquid friction of sliding.

The coating material was intermetallic Ni-Al and Ni-Ti powder alloys, as well as the alloy Ni-Cr-B-Si-C hardened with solid carboboride phases.

Tests conducted on laboratory benches and in real operating conditions showed that the application of protective coatings using a plasma torch with annular powder injection makes it possible to exclude additional thermal treatment of coatings from the technological process.

The best results for all types of testing were revealed when testing a coating sprayed with intermetallic Ni-Al alloy.

Wear-resistant coating sprayed with self-fluxing alloy Ni-Cr-B-Si-C significantly worsens the sliding friction conditions, as a result its use is not recommended without melting additional heat treatment to restore the surfaces of parts working in sliding friction pairs.

**Keywords:** Plasma spraying, wear-resistant coatings, powder alloys, laboratory tests, wear resistance, contact-pulse loads.

### **Введение**

Современное оборудование и оснастка плазмотермических технологий позволяют наносить износостойкие покрытия порошковыми сплавами без их дополнительной термической обработки [1-3]. Исключение дополнительной термической обработки из технологического маршрута получения износостойких покрытий позволяет избежать изменения свойств основного металла восстанавливаемых деталей, существенно уменьшить зону термического влияния плазмотермического процесса, а также упростить и, следовательно, удешевить технологию реставрационных работ. Это расширяет перечень повреждённых и изношенных деталей машин, подлежащих ремонту [4].

Внедрение новых технологий и материалов для восстановления и упрочнения изношенных поверхностей деталей машин требует достоверной оценки защитных свойств наносимых покрытий.

В данной работе исследовали пригодность износостойких покрытий, нанесённых порошковыми сплавами, в потоке плазмы для восстановления и упрочнения деталей, работающих в сложных условиях эксплуатации: при циклическом ударном воздействии твёрдым индентором и в условиях трения скольжения в паре с бронзой БрС30 и в паре с углеродистой сталью.

### **Методы**

Износостойкие покрытия наносили, используя плазматрон, оснащённый секционированной межэлектродной вставкой и узлом кольцевого ввода с газодинамической фокусировкой порошковых сплавов [1 - 3].

Порошковые сплавы для напыления износостойких покрытий были выбраны по результатам предыдущих исследований [4]:

- Никель-титановый порошковый сплав ПВ-ПН55Т45 (Ti- 45%, С- 0,07%, Ni- остальное), с размером частиц - 40-100 мкм. Данный сплав применяется для получения интерметаллидных покрытий на изделиях, работающих в щелочах, морской воде и на воздухе при температурах до 600°C.
- Никель-алюминиевый порошковый сплав ПВ-Н85Ю15 (Ni- 85%, Al- 15%). Сплава восстановленный с частицами иррегулярной формы, размером - 40-100 мкм. Данный порошковый сплав применяется для получения покрытий с интерметаллидной структурой. Твердость получаемых покрытий составляет 300 НВ, температура плавления - 1400°C. Покрытий порошковым сплавом ПВ-Н85Ю15 применяют для повышения жаропрочности изделий, и обеспечения коррозионной стойкости в воде и щелочах.
- Порошковый износостойкий самофлюсующийся сплав ПР-НХ16СР3 ГОСТ 21448-75 (Cr - 14-18%; В - 2,8-3,8%; Si - 3,0-4,5%; Fe до 5%; С - 0,6-1,0%; Ni - остальное) наносили на подслои из Ni-Al сплава ПВ-Н85Ю15.

## Результаты

### Испытания на контактную усталость

Условия ударной усталости, кавитации, гидроабразивного и газоабразивного воздействия и других видов циклических импульсных нагрузок возникают при эксплуатации широкого ряда деталей машин и механизмов [5 - 6].

Стойкость покрытий к ударному циклическому воздействию оценивали на специально разработанном стенде для повторно-ударного нагружения [4]. Энергия импульсов усилий циклического нагружения составила 3 Дж. Параметры нагружения подбирались так, чтобы защитные покрытия образцов при испытаниях выдерживали порядка 1000 ударов.

Защитные покрытия толщиной 0,5-0,6 мм наносили на образцы из малоуглеродистой стали 10 ГОСТ 1050-2013.

Износостойкость покрытия оценивали по диаметру лунки, создаваемой шаровым индентором диаметром 10 мм. Размер лунки контролировали в процессе испытаний с помощью отсчётного микроскопа. За критерий предельного количества циклов нагружения покрытия приняты момент растрескивания покрытия.

Результаты испытаний представлены на графиках зависимости величины диаметра лунки, оставленной индентором, от числа циклов нагружения (рис. 1, 3, 5, 7).

После испытаний готовили микрошлифы в поперечном сечении образцов, совпадающем с центром лунки, исследовали макро и микроструктуру стали с деформированным покрытием (рис. 2, 4, 6, 8).

Образец без защитного покрытия получал значительные повреждения уже после 100 ударов (рис. 1,2).

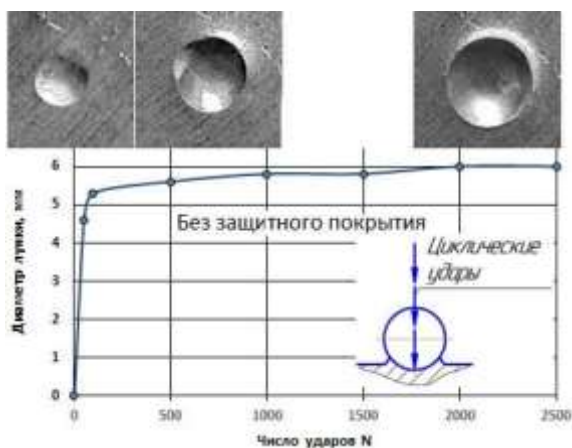


Рис. 1. Стойкость стали 10 к контактно-импульсному воздействию

Fig. 1. Resilience of steel 10 to the contact-pulse impact

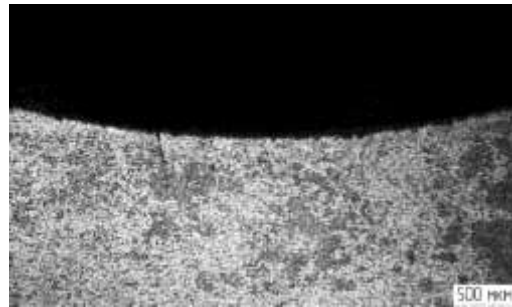


Рис. 2. Повреждение стали 10 без защитного покрытия (в поперечном сечении) при контактно-импульсном воздействии

Fig. 2. Damage of steel 10 without protective coating (in cross section) during contact-pulse impact

Защитные покрытия, напылённые любыми использованными порошковыми сплавами, увеличивают стойкость к ударно-циклическим нагрузкам (рис. 3 - 8).

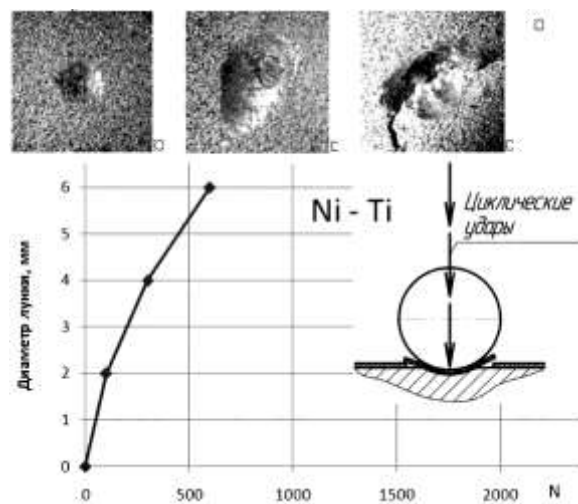


Рис. 3. Стойкость плазменнонапылённых Ni-Ti покрытий к контактно-импульсному воздействию

Fig. 3. Resistance of plasma-dusted Ni-Ti coatings to contact-pulse impact

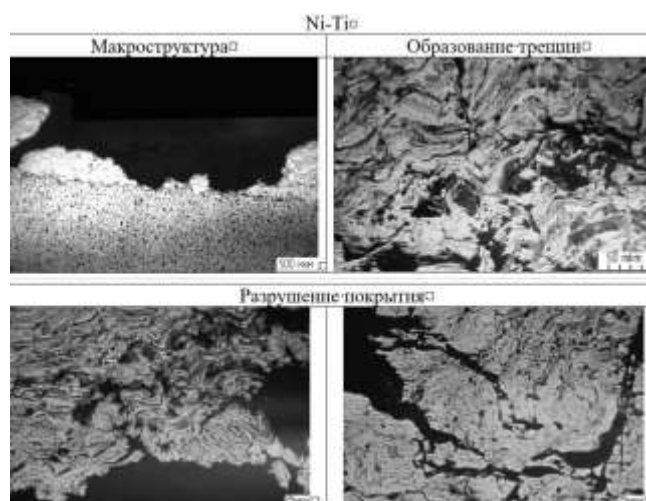


Рис. 4. Повреждение плазменнонапылённых Ni-Ti покрытий (в поперечном сечении) при контактно-импульсном воздействии

Fig. 4. Damage to plasma-dusted Ni-Ti coatings (in cross section) in contact-pulse exposure

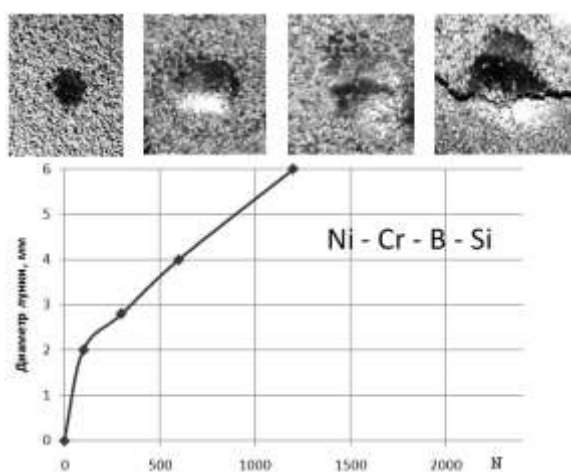


Рис. 5. Стойкость плазменнонапылённых Ni-Cr-B-Si-C покрытий к контактно-импульсному воздействию

Fig. 5. Resistance of plasma-dusted Ni-Cr-B-Si-C coatings to contact-pulse impact

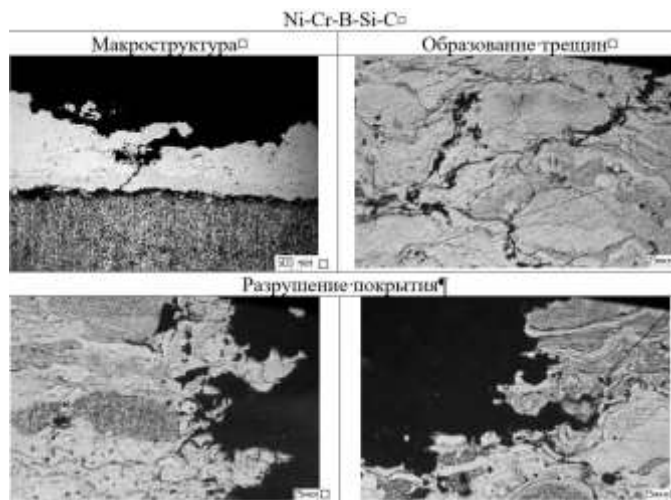


Рис. 6. Повреждение плазменнонапылённых Ni-Cr-B-Si-C покрытий (в поперечном сечении) при контактно-импульсном воздействии

Fig. 6. Damage to plasma-dusted Ni-Cr-B-Si-C coatings (in cross-section) in contact-pulse exposure

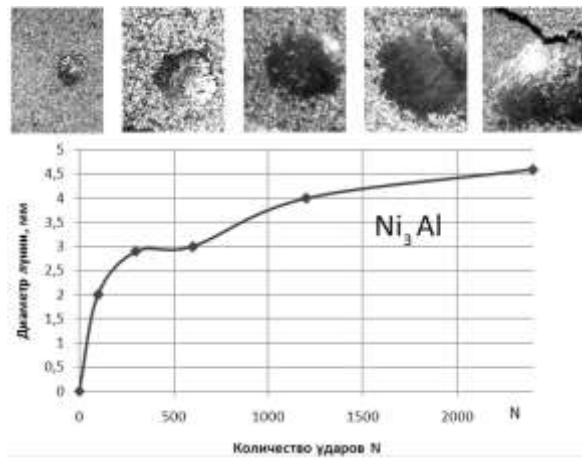


Рис. 7. Стойкость плазменнонапылённых Ni-Al покрытий к контактно-импульсному воздействию

Fig. 7. Resistance of plasma-dusted Ni-Al coatings to contact-pulse impact

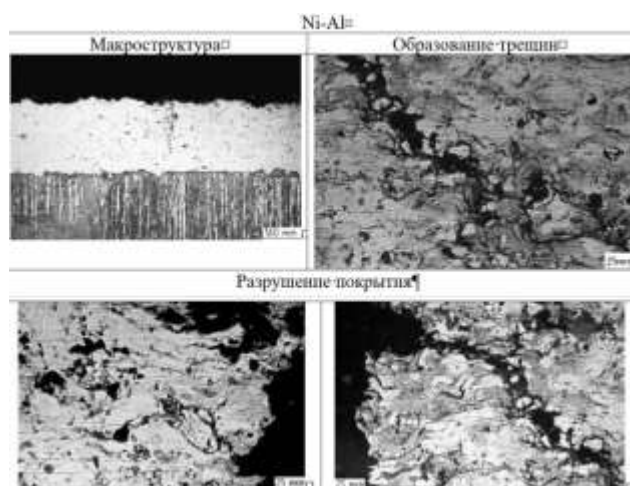


Рис. 8. Повреждение плазменнонапылённых Ni-Al покрытий (в поперечном сечении) при контактно-импульсном воздействии

Fig. 8. Damage to plasma-dusted Ni-Al coatings (in cross section) in contact-pulse exposure

Трещины для всех вариантов покрытия возникают на поверхности соединения с основой и на границах между частицами порошка напылённого слоя. Дальнейшее распространение трещин проходило большей частью по телу частиц. Это косвенно свидетельствует о высокой когезионной прочности полученных покрытий.

Испытания показали, что наиболее надёжную защиту от ударного циклического воздействия обеспечивает покрытие, нанесённое порошковым Ni-Al сплавом (рис. 7,8).

Следует отметить, что после разрушения защитного Ni-Al слоя на поверхности основного материала не оставлено следов повреждений.

Натурные испытания плазменно напылённых защитных покрытий проводили при их нанесении слоем толщиной 300 мкм на лопасти судового гребного винта теплохода проекта КС-101Д. В результате испытаний было установлено, что по окончании навигации, прошедшей в жёстких условиях эксплуатации при высокой скорости потока, несущего на мелководье песок и гальку, защищённый покрытиями гребной винт сохранил свою работоспособность. При этом контрольный гребной винт, который эксплуатировался в тех же условиях на реках Катунь, Бия и Верхняя Обь, потребовал ремонта в течение эксплуатации, а по окончании навигации пришёл в полную негодность [4].

#### **Испытания износостойких покрытий в парах трения**

Триботехнические испытания износостойких покрытий проводили на машине трения типа МИ-1М по ГОСТ 23.222-84 (рис. 9). При этом вращающимся индентором служил диск из закалённой стали 40 диаметром 75 мм с износостойким покрытием, нанесённым на его цилиндрическую поверхность. Контртелом для диска служили колодки, изготовленные из стали Ст3, а также вырезанные из бронзовых вкладышей подшипника коленчатого вала судового дизеля. Размер поверхности контакта колодок составил 10x10 мм. Жидкостное трение обеспечивалось за счёт погружения нижней части диска в ванночку, наполненную моторным маслом SAE20.

Такая схема испытания позволяет более объективно оценить триботехнические характеристики пары трения, нежели схема, в которой индентором является стальной закалённый диск, а испытуемая поверхность - колодкой [7-8]. Это связано с тем, что при реставрационных работах покрытия наносят на детали типа «вал», а подшипники заменяют новыми.

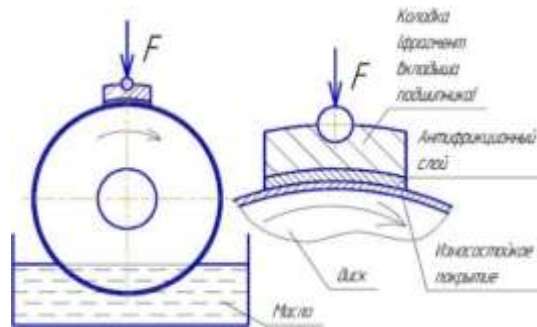


Рис. 9. Схема испытаний износостойких покрытий на трения по схеме «диск - колодка»

Fig. 9. The scheme of testing wear-resistant coatings according to friction on the «disk - pad» system

Поверхность покрытия для исследования триботехнических свойств обрабатывали бесцентровым шлифованием абразивным материалом с зернистостью 20 мкм.

Нагрузки при испытаниях задавали последовательно ступенчато величинами: 5,0; 6,0; 7,0; 8,0; 9,0 МПа. Продолжительность трения при каждой нагрузке составляла 0,25 часа. Линейная скорость поверхности дисков соответствовала 0,8 м/с.

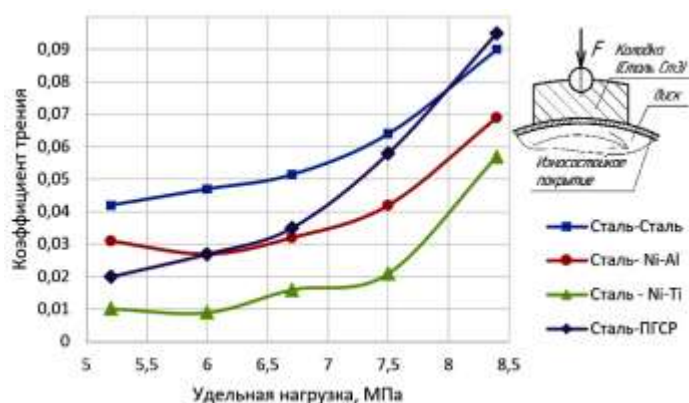
В процессе испытания фрикционных пар фиксировали коэффициент трения. По окончании испытания определяли потерю массы пары трения.

Триботехнические характеристики пары «износостойкое покрытие - углеродистая сталь» представлены на рис. 10; для пар трения «износостойкое покрытие бронзовый вкладыш БрС30» на рис. 11.

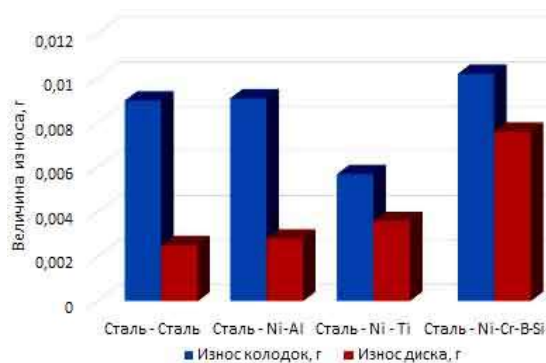
Состояние поверхности трения колодок из подшипникового сплава и дисков с напылённым покрытием после испытаний показано на рис. 12.

При трении дисков по колодке, изготовленной из углеродистой стали, при нагрузках до 8,0 МПа снижение коэффициента трения, то есть улучшение триботехнических свойств наблюдалось для образцов дисков, покрытых всеми исследованными износостойкими материалами. При достижении давления в зоне контакта пары трения «сталь - износостойкое покрытие» свыше 8,0 МПа происходит резкое увеличение коэффициента трения. Это связано с изменением условий трения от жидкостного к контактному. В отсутствие устойчивого масляного клина между трущимися поверхностями никель-хром-бор-кремниевое покрытие оказывает негативное воздействие на процесс трения. Фрагменты покрытия с твёрдыми карборидными частицами выкрашиваются с поверхности, их обломки врезаются в материал колодки, приводя к образованию задиrow и ускоренному изнашиванию пары трения.





а



б

Рис. 10. Влияние материала износостойкого покрытия на триботехнические характеристики при трении по стали:

а - Зависимость коэффициента трения от нагрузки; б - Износ пар трения

Fig. 10. The effect of the wear-resistant coating material on tribotechnical characteristics during friction on steel: a - Dependence of friction factor on the load; b – Wear of friction pairs

При испытаниях на трение покрытий, напылённых износостойкими сплавами, в паре с бронзовой колодкой лучший результат получен для никель-алюминиевого сплава. Коэффициент трения в этой паре образцов при испытаниях в диапазоне исследованных нагрузок менялся в незначительных пределах (рис. 11а). Износ пары трения «сталь - никель-алюминиевый сплав» оказался минимальным из всех исследованных (рис. 11б). Это говорит о том, что характер трения был неизменно жидкостной, что подтверждается наружным видом поверхностей трения (рис. 12). На диске, защищённом никель-алюминиевым сплавом, после испытаний сохранился рельеф поверхности, полученный в результате механической обработки.

Напыление трущейся поверхности диска никель-титановым сплавом положительного влияния на триботехнические характеристики не оказывает. При нагрузках более 6,0 МПа коэффициент трения при испытаниях резко возрастает. Увеличение коэффициента трения происходит, как показывает вид изношенной поверхности, вследствие образования трещин в покрытии и выкрашивании из него отдельных фрагментов. Повреждение маслоудерживающего рельефа поверхности

диска приводит к переходу трения с жидкостного вида на контактный. Одновременно с увеличением силы трения возрастает износ трущихся пар.

Покрытие диска Ni-Cr-B-Si-C сплавом оказывает резко негативное влияние на процесс трения. При давлении в паре трения более 6,0 МПа характер процесса трения меняется с жидкостного на контактное. На поверхности обоих трущихся пар трения: как диска, так и колодки при нагрузках более 6,0 МПа остаются глубокие, грубые борозды, возникшие при шаржировании осколками твёрдых частиц, содержащих первичные карбобориды. Поверхность антифрикционного бронзового вкладыша за время испытаний оказалась практически полностью истёртой осколками материала покрытия, которые выкрашивались с поверхности диска. Фрагменты бронзы в свою очередь обнаружены на поверхности покрытия из сплава ПР-НХ16СРЗ.

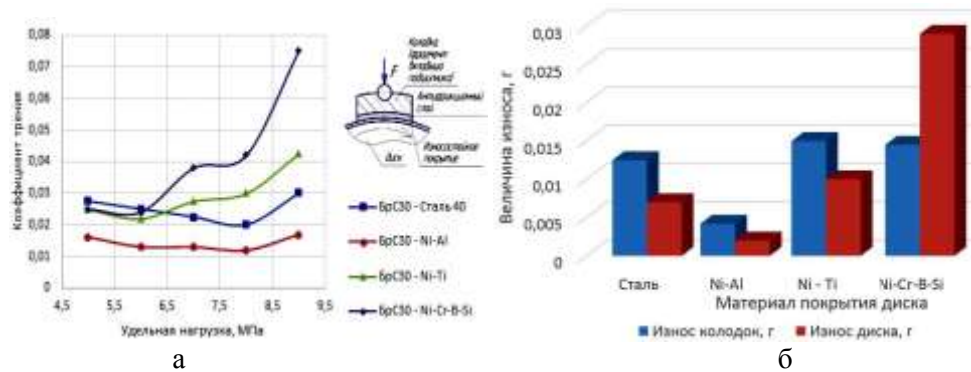


Рис. 11. Рис. 10. Влияние материала износостойкого покрытия на триботехнические характеристики при трении по бронзе:  
 а - Зависимость коэффициента трения от нагрузки  
 б - Износ пар трения

Fig. 11. The effect of the wear-resistant coating material on tribotechnical characteristics during friction on bronze:  
 a - Dependence of friction factor on the load  
 b - Wear of friction pairs

### Обсуждение

Анализ микроструктуры покрытия показывает, что при напылении порошкового сплава с твёрдофазным упрочнением, несмотря на высокую энергию двухфазного потока, которую обеспечивает плазматрон «ПНК-50», не удалось избежать дефектов в виде пленок оксидов, не полностью расплавившихся частиц, пор, свойственных для напылённых покрытий [9]. Это привело к образованию покрытия со структурной и фазовой неоднородностью [10].

В то же время никель-хром-бор-кремниевые самофлюсующиеся сплавы давно и успешно применяются в технологических процессах восстановления и упрочнения поверхностей деталей, работающих в сложных условиях нагружения. Для успешного применения этих сплавов технология нанесения покрытий должна включать дополнительную термическую обработку, обеспечивающую их оплавление [11 - 15].

Предложенные методики стендовых испытаний защитных свойств покрытий при жидкостном трении и контактно-импульсном нагружении достоверно имитируют условия работы реальных деталей.

Проведёнными испытаниями установлено, что, если дело касается защиты стальной поверхности от ударного циклического воздействия, то плазменное напыление покрытий, нанесённое любым из исследованных в данной работе порошковых сплавов, даёт положительный эффект. При испытаниях, проведённых при всех исследованных методиках, вариант покрытия интерметаллидным Ni-Al сплавом оказался наиболее удачным.

Регулярное нанесение защитных покрытий, например, в период ремонта речной техники, может обеспечить значительное повышение долговечности деталей, работающих в условиях трения скольжения и ударно-циклического износа.

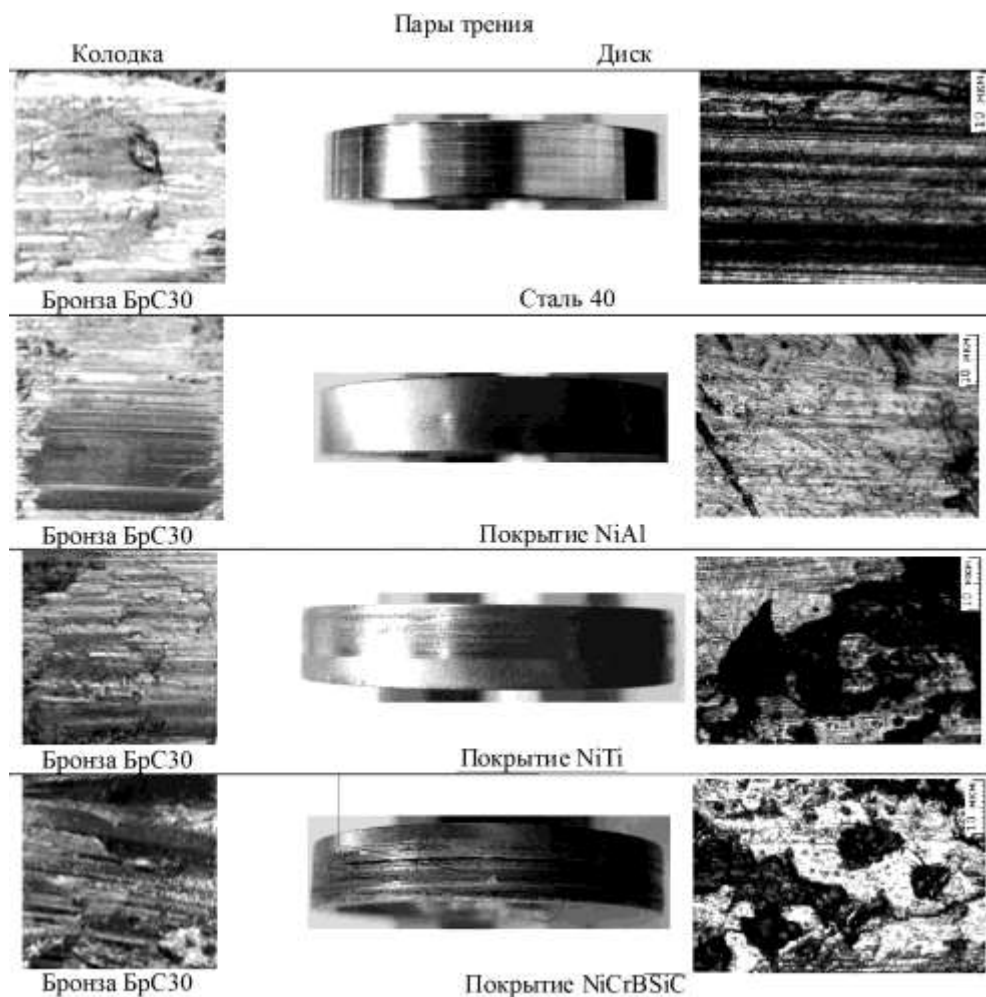


Рис. 12. Вид поверхностей пар трения (колодок и дисков) после испытаний

Fig. 12. View of friction pairs surfaces (pads and discs) after tests

### **Заключение**

При исследовании процесса трения скольжения лучшие триботехнические характеристики показало покрытие, нанесённое порошковым Ni-Al сплавом. Трение в паре с бронзовой колодкой носило жидкостной характер во всём исследованном диапазоне нагрузок. В результате получен минимальный износ обеих пар трения «бронза -Ni-Al сплав».

Покрытие изделий интерметаллидным порошковым сплавом ПВ-ПН55Т45, как показали проведённые исследования, не способствует улучшению триботехнических характеристик.

Износостойкое покрытие самофлюсующимся сплавом ПР-НХ16СР3 ГОСТ 21448-75 при отсутствии дополнительной обработки существенно ухудшает условия трения скольжения.

Плазменное напыление с применением современного оборудования для защиты деталей от изнашивания при трении и ударном воздействии при оптимизации состава сплава возможно без его дополнительного оплавления.

### **Список литературы**

1. The technique of formation of the axisymmetric heterogeneous flow for thermal spraying of powder materials / V.I. Kuzmin, A.A. Mikhali'chenko, O.B. Kovalev, E.V. Kartayev, N.A. Rudenskaya // Journal of Thermal Spray Technology. – 2012. – Vol. 21, № 1. – P. 159–168. – DOI: 10.1007/s11666-011-9701-6
2. Влияние режимов плазменного напыления на структуру и свойства покрытий из Ni3Al / Е. Е. Корниенко, Д. О. Муль, О. А. Рубцова [и др.] // Теплофизика и аэромеханика. – 2016. – Т. 23. – № 6. – С. 957-966.
3. V. Kuzmin, I. Gulyaev, D. Sergachev, S. Vaschenko, E. Kornienko, A. Tokarev Equipment and technologies of air-plasma spraying of functional coatings // MATEC Web of Conferences 129, 01052 (2017) ICMTE 2017. DOI: 10.1051/mateconf/201712901052
4. В.И. Кузьмин, И.П. Гуляев, Д.В. Сергачёв, С.П. Ващенко, Б.В. Палагушкин, А.О. Токарев, М.Г. Мензилова Воздушно-плазменное напыление кавитационно- и гидроабразивностойких покрытий Теплофизика и аэромеханика, 2020, том 27, № 2. С.297-307
5. Мурманский В.Е., Аронсон К.Е., Бродов Ю.М. Влияние повреждаемости оборудования технологических подсистем на функциональные отказы паротурбинных установок// Надёжность и безопасность энергетики, 2017, Т. 10, № 4. С. 322-329 DOI: 10.24223/1999-5555-2017-10-4-322-329
6. David J.E., GARY D.H., HARRIS F.C. Predictive maintenance techniques and their relevance to construction plant // Journal of quality in maintenance engineering 1998, Vol. 4, №1. P. 25-37 DOI: 10.1108/13552519810369057
7. Романов И.В., Задорожный Р.Н.. Оценка триботехнических свойств покрытия, полученного электроискровым упрочнением // Технический сервис машин 2020, №: 4 (141). С. 157-163. DOI: 10.22314/2618-8287-2020-58-1-157-163
8. Konoval V.P., Umanskyi O.P., Chernatska V.Y., Subbotin V.I., Leitans A., Boiko I. Detonation-sprayed coatings of (Ti, CR)B<sub>2</sub>-NiAlCr Composite materials. Mechanical and tribotechnical properties // Powder metallurgy and metal ceramics 2020, Vol. 59, №: 7-8. P: 411-423. DOI: 10.1007/s11106-020-00175-0
9. Kornienko E., Smirnov A., Kuz'min V. Researches structure and properties of self-fluxing coating, obtained by air-plasma // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 698. – P. 405–410. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.405.
10. Microstructures and mechanical properties of metallic NiCrBSi and composite NiCrBSi-WC layers manufactured via hybrid plasma/laser process / N. Serresa, F. Hlawka, S. Costil, C. Langlade, F. Machi // Applied Surface Science. – 2011. – Vol. 257, iss. 12. – P. 5132–5137. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2010.11.062.
11. Влияние температуры оплавления на структуру и свойства самофлюсующихся покрытий на основе никеля / Е. Е. Корниенко, А. А. Никулина, А. Г. Баннов [и др.] // Обработка металлов

(технология, оборудование, инструменты). – 2016. – № 4(73). – С. 52-62. – DOI 10.17212/1994-6309-2016-4-52-62.

12. Microchemical and microstructural studies in a PTA weld overlay of Ni–Cr–Si–B alloy on AISI 304L stainless steel / C. Sudha, P. Shankar, R.V. Subba Rao, R. Thirumurugesan, M. Vijayalakshmi, B. Raj // *Surface & Coatings Technology*. – 2008. – Vol. 202. – P. 2103–2112. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2007.08.063.

13. Microstructures of metallic NiCrBSi coatings manufactured via hybrid plasma spray and in situ laser remelting process / N. Serres, F. Hlawka, S. Costil, C. Langlade, F. Machi // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2011. – Vol. 20 (1–2). – P. 336–343. – DOI: 10.1007/s11666-010-9565-1.

14. A study on microstructure and flame erosion mechanism of a graded Ni–Cr–B–Si coating prepared by laser cladding / H.-F. Xuan, Q.-Y. Wang, S.-L. Bai, Z.-D. Liu, H.-G. Sun, P.-C. Yan // *Surface & Coatings Technology*. – 2014. – Vol. 244. – P. 203–209. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.02.021.

15. Microstructures and environmental assessment of metallic NiCrBSi coatings manufactured via hybrid plasma spray process / N. Serres, F. Hlawka, S. Costil, C. Langlade, F. Machi // *Surface & Coatings Technology*. – 2010. – Vol. 205. – P. 1039–1046. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2010.03.048.

### References

1. The technique of formation of the axisymmetric heterogeneous flow for thermal spraying of powder materials / V.I. Kuzmin, A.A. Mikhal'chenko, O.B. Kovalev, E.V. Kartaev, N.A. Rudenskaya // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2012. – Vol. 21, № 1. – P. 159–168. – DOI: 10.1007/s11666-011-9701-6.

2. Kornienko E.E., Mul' D.O., Rubtsova O.A., Vaschenko 2. S.P., Kuzmin V.I., Gulyaev I.P., Sergachev D.V. Effect of plasma spraying regimes on structure and properties of Ni3 Al coatings. // *Thermophysics and Aeromechanics*, 2016, vol. 23, iss. 6, pp. 919–927. DOI: 10.1134/S0869864316060147.[3] V. Kuzmin, I. Gulyaev, D. Sergachev, S. 3. Vaschenko, E. Kornienko, A. Tokarev Equipment and technologies of air-plasma spraying of functional coatings // *MATEC Web of Conferences* 129, 01052 (2017) ICMTMTE 2017. DOI: 10.1051/mateconf/201712901052

4. V.I. Kuzmin, I.P. Gulyaev, D.V. Sergachev, S.P. Vashchenko, B.V. Palagushkin, A.O. Tokarev, M.G. Menzilova Air-plasma spraying of cavitation and hydroabrasive-resistant coatings. // *Thermophysics and Aeromechanics*, 2020, Vol. 27, No. 2. P. 297 – 307. DOI: 10.1134/S0869864320020109

5] Murmanskij B.E., Aronson K.E., Brodov YU.M. Vliyanie povrezhdaemosti oborudovaniya tekhnologicheskikh podsistem na funktsional'nye otkazy paroturbinnih ustanovok // *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki*, 2017, Vol. 10, № 4. С. 322-329 DOI: 10.24223/1999-5555-2017-10-4-322-329

6. David J.E., GARY D.H., HARRIS F.C. Predictive maintenance techniques and their relevance to construction plant // *Journal of quality in maintenance engineering* 1998, Vol. 4, №1. P. 25-37 DOI: 10.1108/13552519810369057

7. Romanov I.V., Zadorozhnyj R.N. Ocenka tribotekhnicheskikh svoystv pokrytiya, poluchennogo elektroiskrovym uprochneniem // *Tekhnicheskij servis mashin* 2020, №: 4 (141). С. 157-163. DOI: 10.22314/2618-8287-2020-58-1-157-163

8. Konoval V.P., Umanskyi O.P., Chernatska V.Y., Subbotin V.I., Leitans A., Boiko I. Detonation-sprayed coatings of (Ti, Cr)B<sub>2</sub>–NiAlCr Composite materials. Mechanical and tribotechnical properties // *Powder metallurgy and metal ceramics* 2020, Vol. 59, №: 7-8. P: 411-423. DOI: 10.1007/s11106-020-00175-0

9. Kornienko E., Smirnov A., Kuz'min V. Researches structure and properties of self-fluxing coating, obtained by air-plasma // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – Vol. 698. – P. 405–410. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.405.

10. Microstructures and mechanical properties of metallic NiCrBSi and composite NiCrBSi-WC layers manufactured via hybrid plasma/laser process / N. Serres, F. Hlawka, S. Costil, C. Langlade, F. Machi // *Applied Surface Science*. – 2011. – Vol. 257, iss. 12. – P. 5132–5137. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2010.11.062.

11. Kornienko E.E., Nikulina A.A., Bannov A.G., Kuz'min V.I., Mildebrath M., Bezrukova V.A., Zhoidik A.A. Vliyanie temperatury oplavleniya na strukturu i svoistva samoflyusyushchikh sya

- покpытии на основе никеля [The influence of flowing temperature on the structure and properties of the self-fluxing coatings]. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2016, no. 4 (73), pp. 52–62. DOI: 10.17212/1994-6309-2016-4-52-62
12. Microchemical and microstructural studies in a PTA weld overlay of Ni–Cr–Si–B alloy on AISI 304L stainless steel / C. Sudha, P. Shankar, R.V. Subba Rao, R. Thirumurugesan, M. Vijayalakshmi, B. Raj // *Surface & Coatings Technology*. – 2008. – Vol. 202. – P. 2103–2112. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2007.08.063.
13. Microstructures of metallic NiCrBSi coatings manufactured via hybrid plasma spray and in situ laser remelting process / N. Serres, F. Hlawka, S. Costil, C. Langlade, F. Machi // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2011. – Vol. 20 (1–2). – P. 336–343. – DOI: 10.1007/s11666-010-9565-1.
14. A study on microstructure and flame erosion mechanism of a graded Ni–Cr–B–Si coating prepared by laser cladding / H.-F. Xuan, Q.-Y. Wang, S.-L. Bai, Z.-D. Liu, H.-G. Sun, P.-C. Yan // *Surface & Coatings Technology*. – 2014. – Vol. 244. – P. 203–209. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.02.021.
15. Microstructures and environmental assessment of metallic NiCrBSi coatings manufactured via hybrid plasma spray process / N. Serres, F. Hlawka, S. Costil, C. Langlade, F. Machi // *Surface & Coatings Technology*. – 2010. – Vol. 205. – P. 1039–1046. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2010.03.048.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Токaрев Александр Олегович** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры Теории корабля, судостроения и технологии материалов, Сибирский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «СГУВТ») 630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: aot51@ngs.ru

**Макагон Любовь Дмитриевна**, ст. преп. кафедры Теории корабля, судостроения и технологии материалов, Сибирский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «СГУВТ») 630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: ledimakagon@mail.ru

**Alexander O. Tokarev** – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Ship Theory, Shipbuilding and Materials Technology, Siberian State University of Water Transport (“SSUWT”) 630099, Novosibirsk, Shchetinkina Str., 33, Russia, e-mail: aot51@ngs.ru

**Lyubov D. Makagon**, Senior Lecturer of the Department of Ship Theory, Shipbuilding and Materials Technology, Siberian State University of Water Transport (“SSUWT”), 630099, Novosibirsk, Shchetinkina Str., 33, e-mail: ledimakagon@mail.ru

Статья поступила в редакцию 09.03.2021; опубликована онлайн 20.12.2021.  
Received 09.03.2021; published online 20.12.2021.