

Исследование структуры и свойств износостойкого газотермического покрытия с содержанием вольфрама

© 2023

*Плесовских Алексей Юрьевич**, аспирант

Крылова Светлана Евгеньевна¹, доктор технических наук, профессор

Оренбургский государственный университет, Оренбург (Россия)

*E-mail: plesovskih@tehno-oren.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5303-9780>

Поступила в редакцию 14.02.2023

Принята к публикации 18.05.2023

Аннотация: Представлены результаты реверс-инжиниринга, включающего металлографические, механические и инженерно-технические исследования отработанных штоков компрессора, изготовленного фирмой Dresser-Rand (Siemens, Германия). Установлено, что оригинальное изделие изготовлено из стали AISI 4140 с нанесенным рабочим покрытием на основе карбида вольфрама на глубину до 0,2 мм методом HVOF. Приведены результаты разработки импортозамещающего технологического процесса получения износостойкого порошкового покрытия системы Ni–Cr–B–WC, наносимого методом холодного газопламенного напыления на поверхность ответственного узла компрессорного оборудования нефтегазовой отрасли. Путем микроанализа установлено, что напыляемые частицы WC сферической формы равномерно распределяются в никелевой связке без образования свободных полостей на границе ламелей, сохраняют размер, идентичный исходной порошковой композиции, при скоростном соударении с подложкой, минимизируют уровень остаточных механических напряжений в поверхностном слое. Показано, что напыленное покрытие обладает высокой микротвердостью (основы – 700 HV_{0,1}, WC – до 2000 HV_{0,1}), что обеспечивает высокую износостойкость при эксплуатации штока в паре трения. Сравнительный анализ трибологических свойств покрытий показал, что при изменении формы, гранулометрического содержания и процентного соотношения карбида вольфрама с 20 до 70 % в никелевой матрице эквивалентно увеличивается общая износостойкость покрытия. Сделан вывод о возможности изготовления импортозамещающего изделия с использованием технологии газопламенного напыления металлургическими порошковыми композициями с содержанием вольфрама. Разработана промышленная технология нанесения износостойкого покрытия на рабочую поверхность штока из стали AISI 4140. Приведены результаты анализа напряженного состояния материала с покрытием, полученным по разработанной технологии, в сравнении с оригинальным изделием. У изделия, полученного по экспериментальной технологии, в процессе нанесения покрытия и последующей его механической обработки формируются равномерные остаточные механические напряжения, не превышающие значения разности главных механических напряжений. Представлены результаты исследования, полученные как на стандартных образцах, так и на пилотной детали.

Ключевые слова: реверс-инжиниринг; шток компрессора; холодное газопламенное напыление; износостойкое покрытие на основе вольфрама; трибологические свойства; остаточные механические напряжения.

Для цитирования: Плесовских А.Ю., Крылова С.Е. Исследование структуры и свойств износостойкого газотермического покрытия с содержанием вольфрама // Frontier Materials & Technologies. 2023. № 2. С. 89–101. DOI: 10.18323/2782-4039-2023-2-64-4.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большинство ответственных деталей насосного и компрессорного оборудования химической и нефтегазоперерабатывающей отрасли промышленности Российской Федерации выполнены по технологиям зарубежных производителей. С учетом сложившейся внешнеэкономической ситуации приобретение и эксплуатация комплектующих данного оборудования, в частности тяжелонагруженных штоков компрессорных установок, затруднительна, однако потребность в данных деталях весьма значительна и исчисляется 800–1500 тыс. шт. в год в пределах государства. Учитывая данный факт, предприятия сервисного обслуживания и ремонта объектов нефтегазовой отрасли вынуждены оперативно решать ряд научно-технических задач, связанных с выпуском импортозамещающей продукции.

Так, в условиях ремонтного машиностроительного предприятия ООО «Технология» в качестве научно-технического задания выполнены металловедческие исследования и реинжиниринг отработанных штоков компрессорного оборудования от зарубежного производителя немецкой фирмы Dresser-Rand Group (Siemens, Германия) с целью определения марки основного материала, а также технологии его поверхностного и объемного упрочнения.

На основании литературных данных, нормативной документации для деталей компрессорного оборудования и имеющегося опыта промышленной эксплуатации изделий технология нанесения защитных покрытий с применением газотермических процессов напыления представлялась наиболее вероятным способом поверхностного упрочнения [1]. В связи с этим актуальной задачей стало определение химического состава, гранулометрических размеров и геометрической формы

исходных оригинальных материалов для газотермического напыления, а также необходимый анализ свойств покрытий.

В работе [2] показано, что напыленные методом HVOF покрытия системы WC–12Ni, содержащие добавки карбидов Cr₃C₂, обладают более низкой пористостью, чем покрытия WC–10Ni в чистом виде, причем их механические свойства зависят не от скорости напыления и состава транспортирующего газа, а от процентного содержания дисперсных фаз на основе хрома. Немаловажное влияние на ударную вязкость и модуль упругости покрытий WC–Cr₃C₂–12Ni оказывает гранулометрическое соотношение мелкого (до 15 мкм) и грубого (100–150 мкм) зерна WC.

Авторы [3] считают, что, несмотря на коррозионную стойкость вольфрамовых покрытий с кобальтовой связкой, последнюю следует заменить на никелевую в целях защиты здоровья человека и окружающей среды, а также по экономическим причинам. При этом в качестве альтернативных покрытий предлагают порошковые смеси на основе WC в качестве твердой фазы с металлической матрицей на основе Fe и Ni (WC–NiMoCrFeCo, WC–FeNiCrMoCu, WC–FeCrAl), указывая на коррозионную стойкость таких покрытий в 3,5%-м растворе NaCl, низкую пористость и значения твердости (≈ 1200 HV), сравнимые с обычным WC–CoCr-покрытием, что обеспечивает возможность их промышленного применения.

Напыляемые композиционные покрытия с содержанием вольфрама способны надежно защитить рабочую поверхность от изнашивания [4; 5]. Вольфрамсодержащие композиционные покрытия обладают повышенной контактной прочностью, твердостью, способностью сохранять стойкость и механические свойства при повышенных температурах, вплоть до 700–800 °C, стойкостью к коррозионным средам за счет добавления молибдена, а также формирования тесных межатомных связей с металлической основой кобальта или никеля [6; 7]. Это особенно актуально, так как детали нефтегазового и энергетического оборудования часто подвергаются термоциклированию, истиранию, эрозии и коррозии в присутствии изнашивающей и коррозионной среды.

Известно, что уменьшение размера зерен WC приводит к повышению твердости и снижению трещиностойкости покрытия [8–10]. В работе [11] проведено сравнение микроструктуры и механических свойств покрытия WC. Авторы отметили, что снижение размера зерен WC значительно увеличивает твердость покрытия за счет усиленного обезуглероживания зерен WC. В источниках [12; 13] анализируется влияние кинематических параметров напыления на толщину, пористость, остаточные напряжения и микротвердость. Показано, что параметры газотермического напыления изменяются взаимосвязанным образом, определяемым геометрией: расстоянием отвода, углом распыления и скоростью перемещения горелки. Изменения указанных технологических факторов, в свою очередь, влияют на условия столкновения частиц, что в значительной степени определяет свойства покрытия.

Анализ литературных источников показал, что термически напыленные покрытия с WC широко используются в промышленности, поскольку они предлагают

эффективный и экономичный метод защиты основного материала от воздействия окружающей среды и придают износостойкость без ущерба для других свойств компонента [14]. К настоящему времени разработан и выпускается широкий ассортимент материалов для нанесения покрытий данного типа. Создано современное технологическое оборудование, проведены многочисленные экспериментальные исследования, определяющие режимы нанесения покрытий, исследованы контактные взаимодействия нанесенных покрытий с поверхностью детали и друг с другом.

Однако задача формирования покрытия с прогнозируемой структурой до сих пор имеет ряд сложностей реализации, связанных с отсутствием объективного контроля прочности и пористости покрытия во время технологического процесса, что не позволяет вводить соответствующие корректировки параметров напыления. В каждом конкретном случае предложения по выбору материала и технологии напыления являются рекомендательными, поскольку даже в пределах одного химического состава покрытия существенно различаются по плотности, пористости, прилагаемым нагрузкам и другим субъективным факторам.

Контроль остаточных напряжений является основной проблемой в технологии нанесения покрытий [15; 16], что может быть особенно критичным в тех случаях, когда существует большое несоответствие между тепловыми, структурными и механическими свойствами слоев и подложек. Поэтому совокупное влияние строения и свойств напыляемого материала и параметров распыления на структуру и остаточные напряжения для каждого конкретного случая требует детального изучения.

Объект исследования – шток компрессора с рабочей поверхностью, упрочненной методом газопламенного напыления порошковой композицией, содержащей карбид вольфрама.

Предмет исследования – режимы газотермического напыления покрытий, обеспечивающие формирование требуемой структуры и эксплуатационных характеристик поверхностного слоя покрытия.

Цель исследования – разработка и апробация рациональной технологии получения вольфрамсодержащего поверхностного покрытия, обеспечивающего требуемое сочетание эксплуатационных свойств импортозаменяющего изделия «шток компрессорной установки» фирмы Dresser-Rand Group (Siemens, Германия).

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе в качестве упрочняющей карбидной фазы использовался карбид вольфрама сферического типа с фракцией 60–80 мкм, замешанный со связкой системы Ni–Cr–B. Одним из этапов планирования и реализации технологии газопламенного напыления была разработка и подготовка состава порошковой композиции с 20–80 %-м содержанием WC.

Газотермическое напыление проводили на технологической установке CastoDyn DS 8000 горючей газобразной смесью ацетилена C₂H₂ и кислорода O₂ в соотношении 1:5 с установленным распыляющим модулем SSM 10, предназначенным для проведения работ по восстановлению и упрочнению деталей металлопорошковыми композициями. Газопламенное напыление

проводилось в режиме непрерывного линейного перемещения горелки относительно вращающейся детали.

Спектральный анализ химического состава испытуемых материалов выполняли на спектрометре PMI-MASTER 13L0059 в соответствии с ГОСТ 18895.

Электронно-микроскопические исследования выполняли методом РЭМ на микроскопе JEOL JCM-6000, оснащенный волновым и энергодисперсионным анализаторами, сканирование осуществляли при варьировании ускоряющего напряжения в интервале 5–15 кВ. Определение элементного состава покрытия выполняли методом микрорентгеноспектрального анализа множественных отдельных зон поверхностного слоя.

Микротвердость напыленного слоя (матрицы и карбидных включений) определяли по методу отпечатка на микротвердомере HVS-1000 согласно ГОСТ 9450-76 при нагрузке 0,968 Н. Замеры проводили на поперечных шлифах с шагом 0,05 мм. Погрешность измерений не превышала 1–3 %. Твердость материала подложки измеряли на твердомере МЕТОЛАБ 601 по методу Бриггелля в соответствии с ГОСТ 9012-59.

Механические испытания основных материалов на растяжение осуществляли на испытательной машине УТС 111.2-100 при комнатной температуре в соответствии с ГОСТ 1497-84. Для испытаний на ударную вязкость использовали маятниковый копер Resil 300, испытания проводили по ГОСТ 9454-78 на образцах с U-образным концентратором напряжения.

Для анализа напряженного состояния материала с покрытием выполнили оценку распределения разности главных механических напряжений (РГМН) по напыленной поверхности, соответствующей по геометрии и протяженности рабочей зоне готового изделия. Для этого провели сравнительные исследования образцов с экспериментальным холодным газопламенным напылением разработанного состава на сталь AISI 4140, а также образцов, полученных из оригинального штока компрессора Dresser-Rand, выполненного из той же стали. Оценку напряженного состояния готового изделия проводили по полученным диаграммам напряжения в покрытии с помощью сканера механических напряжений STRESSVISION, работающего на основе магнитоанізотропного метода.

Схема измерения РГМН представлена на рис. 1. По данной схеме изготавливался шаблон и крепился на поверхность штока с напыленным покрытием.

Определение пористости покрытия выполняли по ASTM E2109-01 на металлографическом микроскопе Eclipse MA200 при 22,1 °С и влажности 55 %.

Испытания на адгезионную прочность покрытий проводили клеевым методом по ASTM C633-13, на универсальной разрывной машине SHIMADZU AGS-X при температуре 24,1 °С и влажности 54 %.

Для аргументированного предложения разработанного покрытия к эксплуатации необходимо было оценить его стойкость к изнашиванию. Износостойкость полученного покрытия оценивали в сравнении с поверхностным слоем оригинального изделия. С целью определения устойчивости покрытия системы Ni–Cr–B–WC к абразивному изнашиванию исследуемые образцы были подвергнуты испытаниям на трение в условиях сухого изнашивания при нагрузке 50 Н, скорости вращения 500 об/мин, температуре 22 °С и влажности 63 %. Испытания проводили на машине трения СМЦ-2 без смазочного материала с целью исключения модифицирующего действия на поверхности трения. В качестве контртела при испытании применяли диск из инструментальной стали 9ХС твердостью 60 HRC. Площадь контакта при испытании – 50 мм².

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно установленному химическому составу (таблица 1), оригинальное изделие «шток компрессора» изготовлено из стали AISI 4140.

Анализ микроструктуры темплетов оригинального изделия показал, что рабочая поверхность детали «шток компрессора» имеет поверхностный слой глубиной 150–200 мкм, принципиально отличающийся от материала основы и не имеющий переходной зоны термического влияния (рис. 2), что подтвердило предположение о нанесении покрытия методом высокоскоростного газопламенного напыления HVOF.

В связи с тем, что механизм получения покрытия предусматривает высокоскоростной удар расплавленных частиц о подготовленную подложку металла (обезжиривание, сушка, активация поверхности, подогрев до 120–150 °С), структура поверхностного слоя формируется за счет образования слоистых ламелей толщиной 5–7 мкм параллельно основе материала. Как правило, между ламелями кристаллизуются мелкие поры и окислы. Такая гетерогенная слоистая структура, несомненно, обладает меньшими прочностными характеристиками, чем исходный материал, однако имеет преимущества при трении, что и обеспечивает длительную эксплуатацию изделия в паре сопряжения «шток – сальниковое уплотнение».

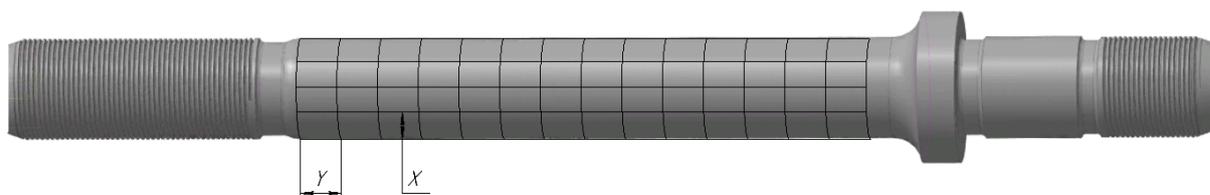


Рис. 1. Схема измерения РГМН:

X – длина измерительного участка, равная 52 мм; Y – ширина измерительного участка, равная 16 мм

Fig. 1. PMSD measurement diagram:

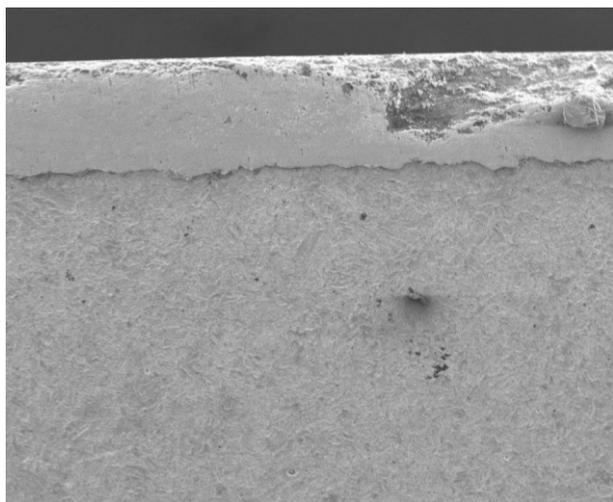
X – measuring section length equal to 52 mm; Y – measuring section width equal to 16 mm

Таблица 1. Химический состав основы изделия, % по массе
Table 1. Chemical composition of the product base, % by weight

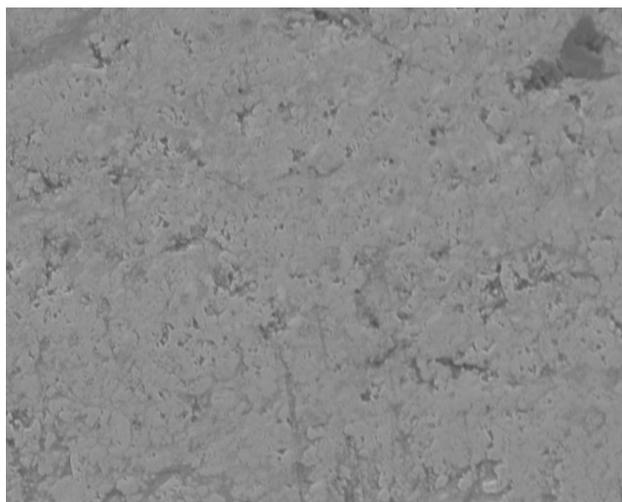
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Fe
Среднее значение*	0,400	0,270	0,960	0,920	0,218	0,054	97,178
AISI 4140	0,430	0,300	1,000	1,100	0,250	–	96,920

* Среднее значение получено по результатам не менее трех измерений.

* The average value is obtained from the results of at least three measurements.



a



b

Рис. 2. Результаты металлографических исследований рабочей поверхности:
a – общий вид поверхности ($\times 100$); *b* – характер строения ($\times 100$)

Fig. 2. The results of metallographic studies of the working surface:
a – surface general view ($\times 100$); *b* – structure type ($\times 100$)

На рис. 3 представлен характерный фрагмент исследуемой области покрытия и состав спектра, соответствующий выделенной области. Химический состав области спектра приведен в таблице 2.

По результатам микрорентгеноспектрального анализа рабочий поверхностный слой содержит порядка 86 % вольфрама, в качестве связки присутствует кобальт в объеме 6–8 %, а наличие углерода, ванадия, хрома и железа позволяет прогнозировать дополнительное влияние карбидного и интерметаллидного механизма упрочнения в кобальтовой связке. Пористость оригинального покрытия равномерно распределена и составляет не более 2,1 % (рис. 4). Интенсивность проявления пористости по толщине покрытия увеличивается к основе материала.

Результаты сравнительных механических испытаний материала оригинального штока и подобранного аналога AISI 4140 после термической обработки представлены в таблице 3.

На основании данных реверс-инжиниринговых исследований определены основные технологические принципы изготовления штоков дожимных компрессорных станций зарубежной фирмой Dresser-Rand Group. Выявлено, что для безаварийной работы данных

изделий нефтегазового машиностроения при контактной нагрузке на шток $0,7 \text{ кг/мм}^2$, давлении в пределах 68 кгс/см^2 , при температуре рабочей среды до $150 \text{ }^\circ\text{C}$, составе попутных нефтесодержащих газов: H_2S – 2 %, CO_2 – 2 %, водяной пар – до 1 %, рабочее покрытие должно иметь дисперсную карбидную структуру на основе вольфрама и адгезионную прочность покрытия не менее 50 МПа.

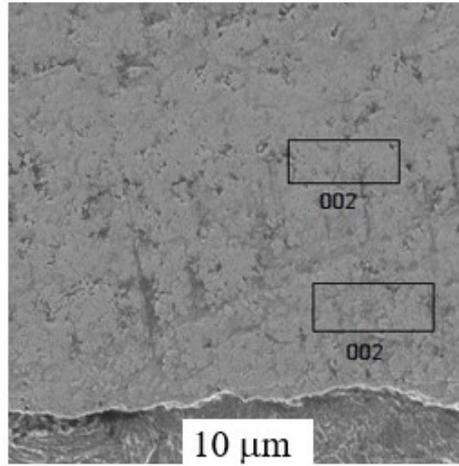
На рис. 5 представлены результаты металлографических исследований с изучением размерности WC в покрытии опытного образца с 20%-м содержанием упрочняющей карбидной фазы.

Из анализа структуры следует, что карбид вольфрама в покрытии представляет собой сферические гранулы, имеющие размер, идентичный исходной порошковой композиции. Это свидетельствует о том, что напыляемые частицы при скоростном соударении с подложкой не подвергаются серьезным механическим напряжениям, вследствие чего их форма и размеры остаются неизменными; они не препятствуют свободному формированию ламелей вязкой никелевой составляющей покрытия, равномерно распределяются в связке, не образуя свободных полостей на границе WC – связка на основе Ni–Cr–B. На рис. 6 и в таблице 4 представлены

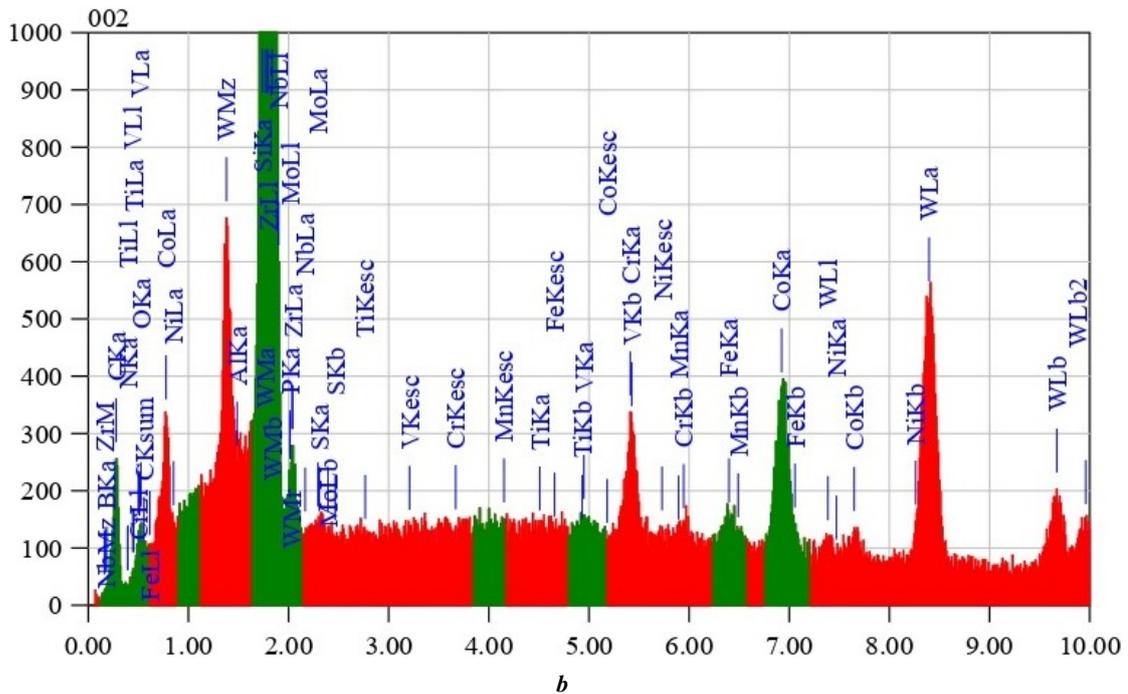
результаты спектрального анализа отдельно взятых карбидных включений WC.

На этапе отработки технологии напыления покрытия на основе вольфрама адгезионная прочность покрытия соответствовала значениям оригинала и варьировалась

в пределах 45–55 МПа. Зафиксирована пористость поверхностного слоя в пределах 6,1 % (при допустимом значении пор до 10 %) [17], микротвердость основы покрытия (Ni–Cr–B) составила порядка 700 HV_{0,1}, а включений карбидов вольфрама – 2000 HV_{0,1}.



a



b

Рис. 3. Элементный состав характерной области покрытия:

a – анализируемый фрагмент покрытия (спектр 002); *b* – спектрограмма соответствующей области анализа

Fig. 3. Elemental composition of the specific coating area:

a – an analyzed fragment of the coating (002 spectrum); *b* – a spectrogram of the respective analysis area

Таблица 2. Химический состав покрытия в области спектра 002, % по массе
Table 2. Chemical composition of the coating in the 002 spectrum area, % by weight

C	V	Cr	Mn	Fe	Co	W
2,27	0,06	2,81	0,03	0,92	7,82	86,09

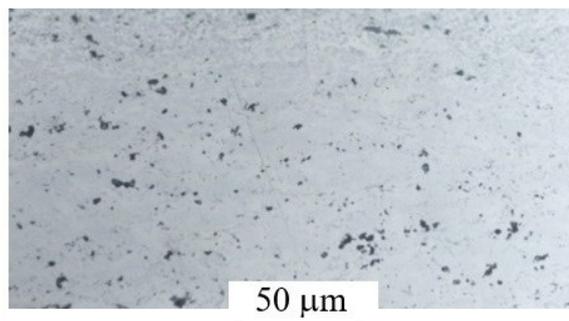


Рис. 4. Микрофотографии шлифа покрытия при измерении пористости
 Fig. 4. Microphotographs of the coating section when measuring porosity

Таблица 3. Механические свойства основного материала изделия
 Table 3. Mechanical properties of the base metal of the product

Характеристика	Оригинал	Материал – аналог AISI 4140
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	347	563
Предел прочности σ_b , МПа	728	784
Относительное удлинение δ_5 , %	23,2	17,1
Относительное сужение ψ , %	63,1	67,9
Ударная вязкость КСУ ⁺²⁰ , Дж/см ²	62,5	176
Твердость, НВ	215	226

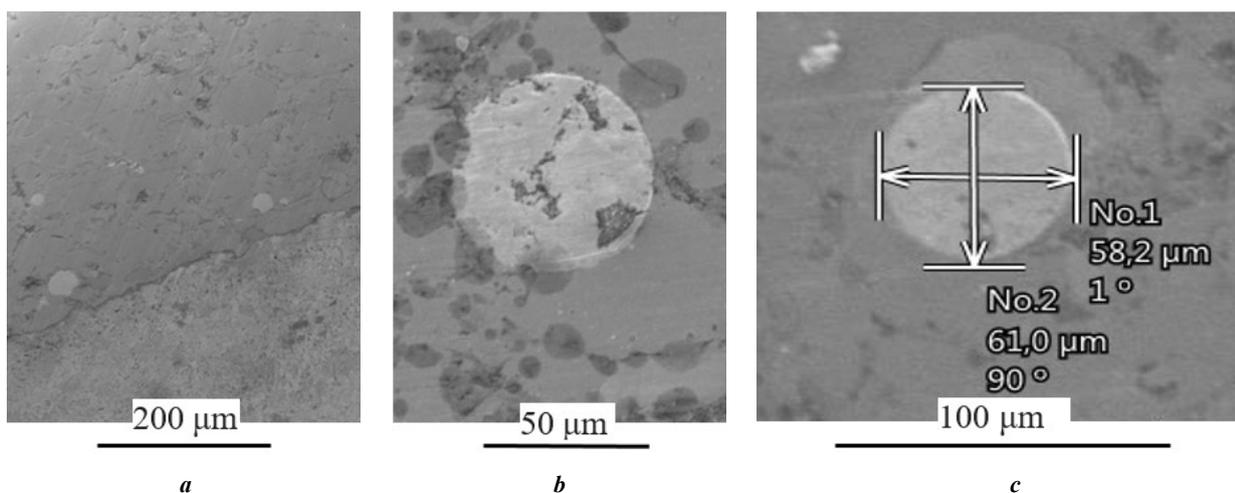
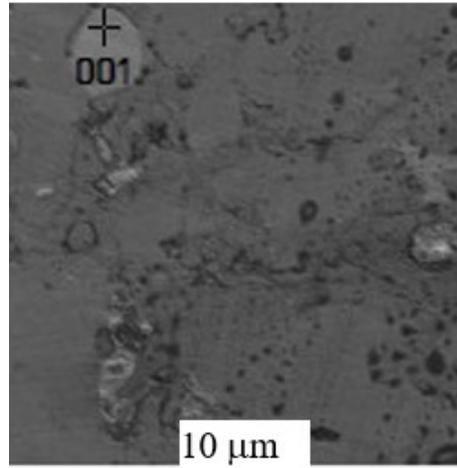


Рис. 5. Структура поверхностного слоя покрытия, полученного методом холодного газопламенного напыления:
 a, b – общий вид структуры; c – размерность и форма частиц карбида вольфрама ($\times 500$)
 Fig. 5. The structure of the coating surface layer produced by cold gas flame spraying:
 a, b – structure general view; c – dimensions and shape of the tungsten carbide particles ($\times 500$)

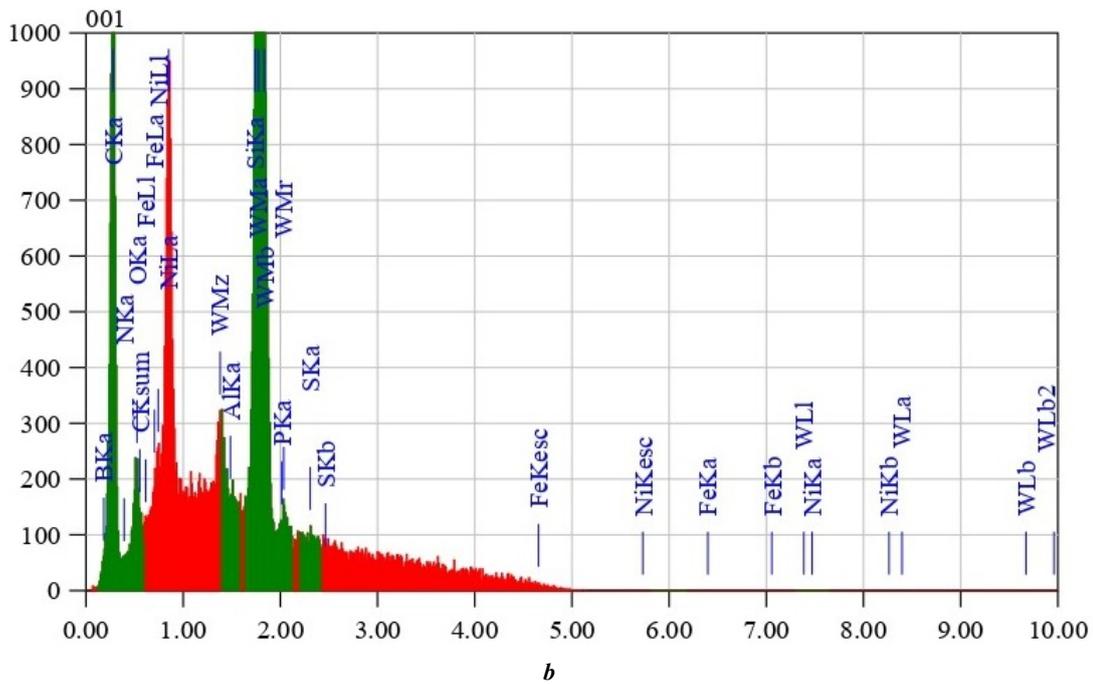
При увеличении процентного соотношения карбида вольфрама с 20 до 70 % эквивалентно увеличивается и общая износостойкость покрытия (таблица 5).

Исходя из проведенных металлографических исследований и испытаний на износостойкость, оптималь-

ным составом для упрочнения поверхностного слоя детали «шток компрессора» является композиция Ni–Cr–B–WC с содержанием карбида вольфрама 70 %. Данное покрытие при меньшем содержании количества WC в объеме обеспечивает удовлетворительные



a



b

Рис. 6. Результаты микрорентгеноспектрального анализа сферического карбида вольфрама:

a – анализируемый фрагмент покрытия (спектр 001); b – спектрограмма анализируемого фрагмента покрытия (спектр 001)

Fig. 6. The results of X-ray microanalysis of spherical tungsten carbide:

a – an analyzed fragment of the coating (001 spectrum); b – a spectrogram of the analyzed fragment of the coating (001 spectrum)

Таблица 4. Химический состав WC в спектре 001, % по массе
Table 4. WC chemical composition in the 001 spectrum, % by weight

C	B	Ni	O	W
32,23	2,54	1,05	1,40	62,78

Таблица 5. Зависимость величины изнашивания от количества карбидной фазы в покрытии
 Table 5. The dependence of the wear value on the carbide phase amount in the coating

Количество карбида вольфрама в покрытии, %	Масса образца, г		Износ, г
	до испытаний	после испытаний	
Опытное напыление			
20	11,45	11,38	0,07
30	11,50	11,43	0,07
50	11,49	11,44	0,05
70	14,65	14,64	0,01
Оригинальный шток			
90	14,57	14,56	0,01

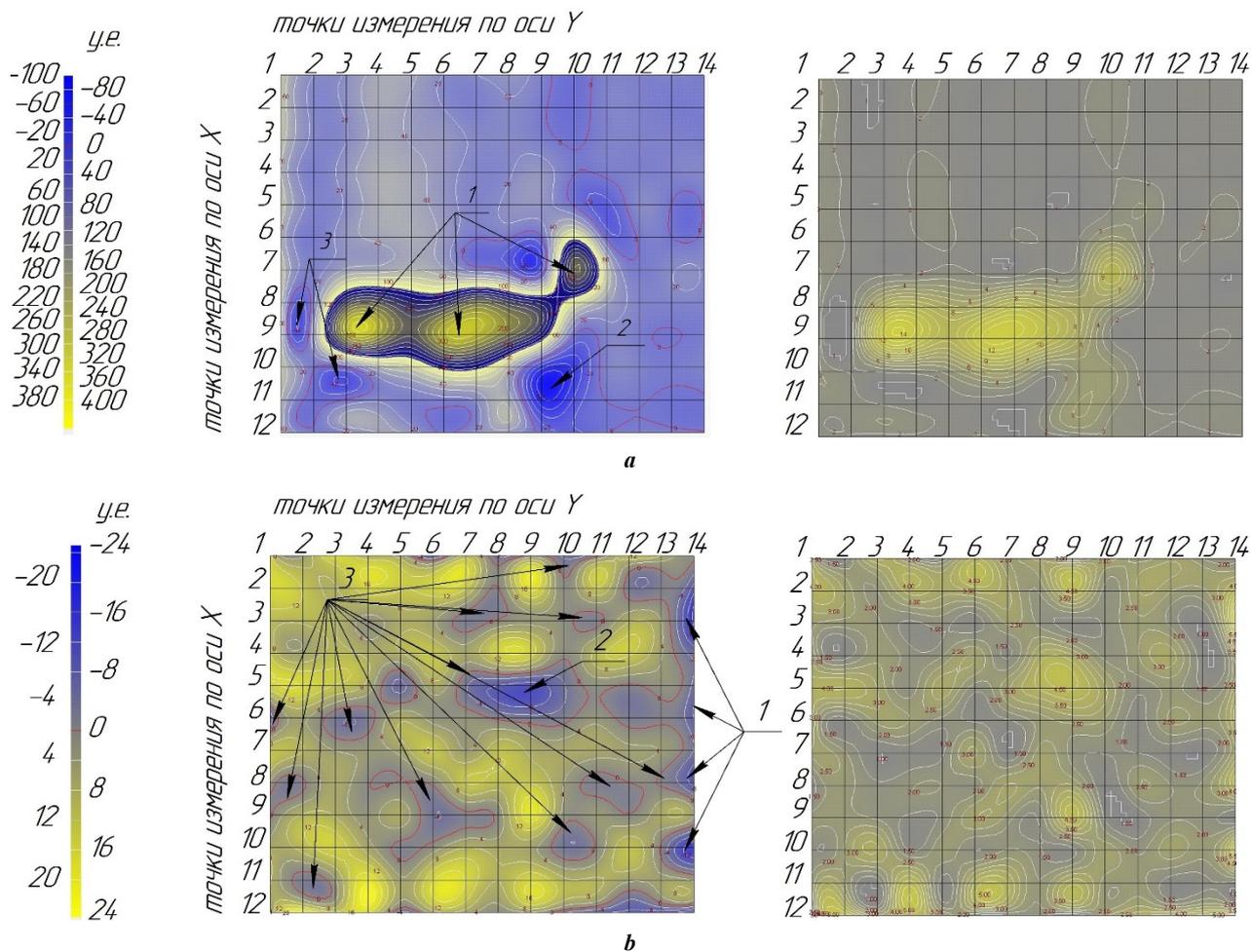


Рис. 7. Картограммы распределения РГМН:

a – экспериментального образца; **b** – оригинального штока компрессора:

1 – зона краевых дефектов, 2 – зона сжимающих напряжений, 3 – компенсационные зоны

Fig. 7. Cartograms of PMSD distribution:

a – of an experimental specimen; **b** – of an original compressor rod:

1 – edge defect zone, 2 – compressive stress zone, 3 – compensation zones

и сопоставимые с оригиналом значения микротвердости, не уступает по стойкости к изнашиванию рабочей поверхности за счет применения комбинированной металлической основы Ni–Cr–В вместо кобальтовой связки оригинала, что обеспечивает дополнительную привлекательность разработки с экономической точки зрения.

Результаты замеров РГМН, полученных с помощью сканера (индикатора) механических напряжений STRESSVISION, приведены на рис. 7.

Численные характеристики, полученные при математической обработке карт распределения РГМН в оригинальном штоке и опытном образце, сведены в таблицу 6.

Анализ картограмм распределения остаточных механических напряжений показал, что метод холодного газопламенного напыления, позволивший получить толщину разработанного покрытия, соответствующую оригинальному изделию (в пределах от 0,2 до 0,25 мм), является оптимальным с точки зрения внутренних напряжений на границе «металл – покрытие» (рис. 6). Численные характеристики, полученные при математической обработке карт распределения РГМН, представленные на рис. 8, отражают сравнительное распределение максимальных напряжений по зонам сканирования.

Из анализа данных (рис. 6, рис. 7) следует, что распределение РГМН по поверхности опытного напыленного образца после изготовления равномерное и не превышает 10 у. е. Данные анализа напряженного состояния с оригинального изделия получены на этапе реверс-инжиниринга, отработанного в течение 4 тыс. ч штока компрессора. Оригинальное изделие имеет две локальные зоны напряженного состояния: зону 8, максимальное значение РГМН в которой составляет

346,84 у. е., и зону 6, максимальное значение РГМН в которой равно 225,5 у. е. Однако средний фон распределения напряжений также стабилен и находится в пределах 10–20 у. е. Наличие зон с повышенными значениями РГМН объясняется накопительным эффектом напряжений в локальных зонах трения при эксплуатации. Полученные данные показывают, что у экспериментального образца с поверхностным упрочнением методом холодного газопламенного напыления в процессе нанесения покрытия и последующей его механической обработки формируются незначительные равномерные остаточные механические напряжения в зоне покрытия, не превышающие значения РГМН по сравнению с технологией зарубежного производителя. Это позволяет обоснованно рекомендовать разработанный состав покрытия и способ его нанесения к апробации на пилотной детали.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Разработка технологии изготовления импортозамещающей детали «шток компрессора» включала: разработку конструкторско-технологической документации, металлографические исследования, инженерно-технические эксперименты [18; 19].

В процессе формирования покрытия методом газопламенного напыления на этапе пластификации и деформирования тугоплавких частиц при скоростном ударе в зоне контакта ранее нанесенных слоев ламелей с поверхностью неминуемо образуются характерные дефекты и свободные полости. Их взаимодействие с атмосферой при оседании пылевидных фракций размером до 80 мкм, а также адсорбция газов на свежесформованных

Таблица 6. Распределение РГМН в оригинальном штоке и напыленном образце
Table 6. PMSD distribution in the original rod and sprayed specimen

№ зоны	Минимальное значение РГМН		Максимальное значение РГМН		Среднее значение РГМН	
	оригинального штока	напыленного образца	оригинального штока	напыленного образца	оригинального штока	напыленного образца
1	–9	–3	21	16	6	6
2	–9	–16	32	12	12	–2
3	1	–10	60	15	31	3
4	–17	–5	65	16	24	6
5	–27	–11	61	13	17	1
6	–67	–6	225	11	79	3
7	–196	–5	–7	12	–102	3
8	–40	–3	347	18	154	7
9	–28	–2	215	13	94	6
10	–99	–11	60	14	–19	1
11	–36	–8	59	21	23	7

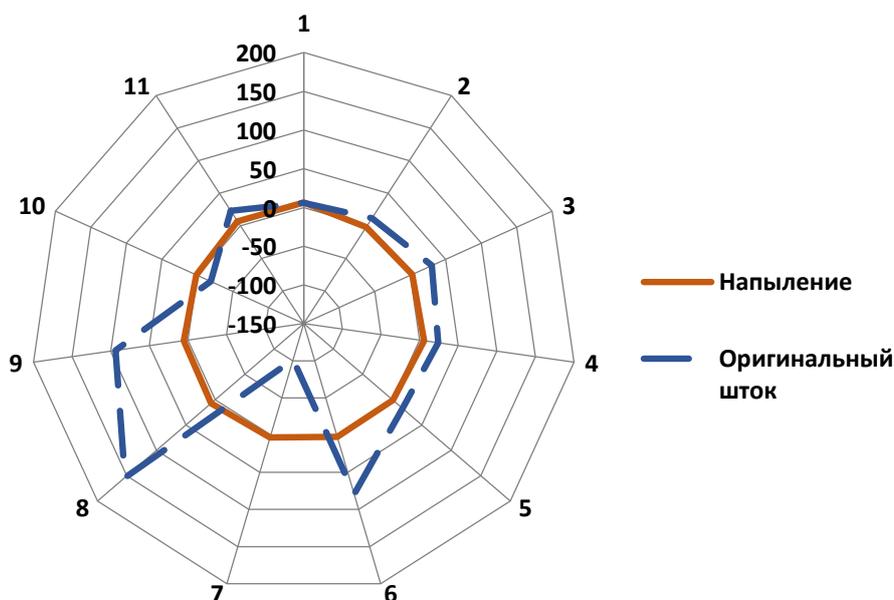


Рис. 8. Сравнительный анализ распределения средних остаточных напряжений в опытном образце и оригинальном изделии

Fig. 8. Comparative analysis of the distribution of average residual stresses in the test sample and the original product

слоях покрытия существенно ухудшают строение, а следовательно, и свойства межслойной зоны покрытия. Уменьшение размера напыляемых частиц позволяет значительно улучшить послойное заполнение покрытия за счет формирования более однородной структуры, повышения ее плотности при одновременном уменьшении объема микропустот. В этой связи выбор фракционного состава и формы порошковых частиц приобретает особое значение.

Так, порошковые композиции для формирования рабочих слоев насосно-компрессорного оборудования должны обеспечивать высокую адгезионную прочность (более 50 МПа), износостойкость и минимальную пористость покрытия. Указанные требования в полной мере можно обеспечить напылением порошковых композиций с включениями карбида вольфрама в рабочем слое. В наших ранних работах [18; 19] уделено внимание сравнению эффективности введения в никелевую матрицу различных по морфологии и гранулометрии частиц карбида вольфрама, показано преимущество введения дисперсных сферических частиц с позиции формирования монолитного поверхностного слоя, исключающего растрескивание, грубые поры и вырывы под нагрузкой. На основании проведенных исследований выявлено, что наилучший результат карбидного упрочнения обеспечивают частицы сферического карбида вольфрама (WC) размером до 50 мкм [17–19], содержащиеся в матрице в пределах 60–70 об. %, что подтверждено настоящими результатами.

Исследования показали, что наличие в напыленном слое никелевой матрицы в виде γ -твердого раствора способствует повышению вязкости разрушения и абразивной стойкости покрытия, а наличие в металлической основе дисперсных высокопрочных сферических карбидных фаз обеспечивает повышенную прочность и износостойкость покрытия в условиях граничного трения и трения без смазки. Сравнительные исследования износостойкости показали, что благодаря упруго-

пластическим свойствам композиционного материала покрытия скорость изнашивания понижается в 1,2–1,3 раза. Повышение износостойкости при постоянном коэффициенте трения связано с упрочнением за счет измельчения структуры и целенаправленного формирования в рабочем слое значительного числа упрочняющих фаз.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. По данным реверс-инжиниринговых исследований оригинального изделия фирмы Dresser-Rand Group (Siemens, Германия) в виде штока дожимной компрессорной станции определена марка основного материала – сталь AISI 4140 (химический состав, мас. %: 0,38–0,43 C; 0,15–0,30 Si; 0,75–1,0 Mn; 0,80–1,10 Cr; 0,15–0,25 Mo; 0,04 S; 0,035 P; остальное – Fe) и технологические особенности изготовления и упрочнения рабочей поверхности за счет нанесения износостойкого вольфрамсодержащего покрытия методом холодного газотермического напыления.

2. Разработан состав износостойкого порошкового покрытия на основе металлической системы Ni–Cr–W с включениями сферического карбида вольфрама (WC). Предложенная технология его нанесения методом холодного газотермического напыления позволила получить поверхностный износостойкий слой 0,2–0,25 мм, обладающий микротвердостью основы в пределах 700 HV_{0,1} с равномерным распределением упрочняющих карбидных фаз микротвердостью до 2000 HV_{0,1}.

3. Установлено, что карбидное упрочнение никелевой матрицы частицами дисперсного сферического карбида вольфрама WC в пределах 60–70 об. % позволяет улучшить послойное формирование lamellar структуры, повысить плотность и однородность структуры, уменьшить объем свободных микропустот на границе «WC – связка» с 10 до 6 %, согласно анализу пористости покрытия.

4. Предложенное покрытие Ni–Cr–B–WC не уступает по стойкости к изнашиванию оригинальному изделию, обладает определенной экономической привлекательностью, обеспечивая точные геометрические размеры и минимальный градиент напряженного состояния, не превышающий 10 МПа. Указанные технологические преимущества позволили приступить к внедрению технологии поверхностного упрочнения штоков компрессорного оборудования в условиях производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барвинок В.А., Шитарев И.Л., Богданович В.И., Докукина И.А., Карасёв В.М. Срабатываемые, износостойкие и теплозащитные покрытия для деталей газового тракта турбины, компрессора и камеры сгорания ГТД // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва. 2009. № 3-1. С. 11–28. EDN: [LADTXX](#).
2. Yao H.-L., Yang Ch., Yi D.-L., Zhang M.-X., Wang H.-T., Chen Q.-Yu., Bai X.-B., Ji G.-Ch. Microstructure and mechanical property of high velocity oxy-fuel sprayed WC-Cr₃C₂-Ni coatings // Surface and Coatings Technology. 2020. Vol. 397. Article number 126010. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2020.126010](#).
3. Testa V., Morelli S., Bolelli G., Benedetti B., Puddu P., Sassatelli P., Lusvarghi L. Alternative metallic matrices for WC-based HVOF coatings // Surface and Coatings Technology. 2020. Vol. 402. Article number 126308. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2020.126308](#).
4. Рахадиллов Б.К., Муктанова Н., Журерова Л.Г. Применение технологии HVOF для получения износостойких покрытий на основе WC – обзор // Вестник НЯЦ РК. 2023. № 1. С. 4–14. DOI: [10.52676/1729-7885-2023-1-4-14](#).
5. Pereira P., Vilhena L.M., Sacramento J., Senos A.M.R., Malheiros L.F., Ramalho A. Abrasive wear resistance of WC-based composites, produced with Co or Ni-rich binders // Wear. 2021. Vol. 482-483. Article number 203924. DOI: [10.1016/j.wear.2021.203924](#).
6. Santos R.F., Ferro Rocha A.M., Bastos A.C., Cardoso J.P., Rodrigues F., Fernandes C.M., Sacramento J., Ferreira M.G.S., Senos A.M.R., Fonseca C., Vieira M.F., Malheiros L.F. The effect of Cr content on the corrosion resistance of WC-Ni-Cr-Mo composites // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2021. Vol. 95. Article number 105434. DOI: [10.1016/j.ijrmhm.2020.105434](#).
7. Santos R.F., Ferro Rocha A.M., Bastos A.C., Cardoso J.P., Rodrigues F., Fernandes C.M., Sacramento J., Ferreira M.G.S., Senos A.M.R., Fonseca C., Vieira M.F., Malheiros Luís F. Microstructural characterization and corrosion resistance of WC-Ni-Cr-Mo composite – The effect of Mo // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2020. Vol. 86. Article number 105090. DOI: [10.1016/j.ijrmhm.2019.105090](#).
8. Wang D., Zhang B., Jia Ch., Gao F., Yu Yu., Chu K., Zhang M., Zhao X. Influence of carbide grain size and crystal characteristics on the microstructure and mechanical properties of HVOF-sprayed WC-CoCr coatings // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2017. Vol. 69. P. 138–152. DOI: [10.1016/j.ijrmhm.2017.08.008](#).
9. Chivavibul P., Watanabe M., Kuroda S., Shinoda K. Effects of carbide size and Co content on the microstructure and mechanical properties of HVOF-sprayed WC-Co coatings // Surface and Coatings Technology. 2007. Vol. 202. № 3. P. 509–521. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2007.06.026](#).
10. Yuan J., Ma Ch., Yang Sh., Yu Zh., Li H. Improving the wear resistance of HVOF sprayed WC-Co coatings by adding submicron-sized WC particles at the splats' interfaces // Surface and Coatings Technology. 2016. Vol. 285. P. 17–23. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2015.11.017](#).
11. Ma N., Guo L., Cheng Zh., Wu H., Ye F., Zhang K. Improvement on mechanical properties and wear resistance of HVOF sprayed WC-12Co coatings by optimizing feedstock structure // Applied Surface Science. 2014. Vol. 320. P. 364–371. DOI: [10.1016/j.apsusc.2014.09.081](#).
12. Katranidis V., Gu S., Allcock B., Kamnis S. Experimental study of high velocity oxy-fuel sprayed WC-17Co coatings applied on complex geometries. Part A: Influence of kinematic spray parameters on thickness, porosity, residual stresses and microhardness // Surface and Coatings Technology. 2017. Vol. 311. P. 206–215. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2017.01.015](#).
13. La Barbera-Sosa J.G., Santana Y.Y., Moreno E., Cuadrado N., Caro J., Renault P.O., Le Bourhis E.Le., Staia M.H., Puchi-Cabrera E.S. Effect of spraying distance on the microstructure and mechanical properties of a Colmonoy 88 alloy deposited by HVOF thermal spraying // Surface and Coatings Technology. 2010. Vol. 205. № 7. P. 1799–1806. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2010.01.017](#).
14. Wang Q., Zhang Sh., Cheng Y., Xiang J., Zhao X., Yang G. Wear and corrosion performance of WC-10Co4Cr coatings deposited by different HVOF and HVAF spraying processes // Surface and Coatings Technology. 2013. Vol. 218. P. 127–136. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2012.12.041](#).
15. Varis T., Suhonen T., Jokipii M., Vuoristo P. Influence of powder properties on residual stresses formed in high-pressure liquid fuel HVOF sprayed WC-CoCr coatings // Surface and Coatings Technology. 2020. Vol. 388. Article number 125604. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2020.125604](#).
16. Santana Y.Y., La Barbera-Sosa J.G., Staia M.H., Lesage J., Puchi-Cabrera E.S., Chicot D., Bemporad E. Measurement of residual stress in thermal spray coatings by the incremental hole drilling method // Surface and Coatings Technology. Vol. 201. № 5. P. 2092–2098. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2006.04.056](#).
17. Крылова С.Е., Плесовских А.Ю., Курносин И.А., Тавтилов И.Ш. Влияние термической обработки на структуру и свойства вольфрамсодержащего покрытия рабочей части нефтегазового оборудования // Черные металлы. 2022. № 12. С. 36–42. DOI: [10.17580/chm.2022.12.05](#).
18. Плесовских А.Ю., Крылова С.Е., Оплеснин С.П. Импортзамещающая технология изготовления деталей нефтегазодобывающей отрасли с нанесением износостойких покрытий на основе вольфрама // Вестник современных технологий. 2019. № 2. С. 9–14. EDN: [WJOBJF](#).
19. Plesovskikh A.Y., Krylova S.E., Oplesnin S.P., Kurnoskin I.A. Import-substituting technology for ma-

manufacturing parts of the oil and gas industry with the application of tungsten based wear-resistant coatings // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 38. Part 4. P. 1595–1598. DOI: [10.1016/j.matpr.2020.08.161](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.161).

REFERENCES

- Barvinok V.A., Shitarev I.L., Bogdanovich V.I., Dokukina I.A., Karasev V.M. Wearability, wearproof and heat-shielding coverings for details of the gas path of the turbine, the compressor and the chamber of combustion of gas turbine engine. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Koroleva*, 2009, no. 3-1, pp. 11–28. EDN: [LADTXX](https://elibrary.ru/ladtxx).
- Yao H.-L., Yang Ch., Yi D.-L., Zhang M.-X., Wang H.-T., Chen Q.-Yu., Bai X.-B., Ji G.-Ch. Microstructure and mechanical property of high velocity oxy-fuel sprayed WC-Cr₃C₂-Ni coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2020, vol. 397, article number 126010. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2020.126010](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126010).
- Testa V., Morelli S., Bolelli G., Benedetti B., Puddu P., Sassatelli P., Lusvarghi L. Alternative metallic matrices for WC-based HVOF coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2020, vol. 402, article number 126308. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2020.126308](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126308).
- Rakhadilov B.K., Muktanova N., Zhurerova L.G. Application of HVOF technology for WC-based wear-resistant coatings – an overview. *Vestnik NYaTs RK*, 2023, no. 1, pp. 4–14. DOI: [10.52676/1729-7885-2023-1-4-14](https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-1-4-14).
- Pereira P., Vilhena L.M., Sacramento J., Senos A.M.R., Malheiros L.F., Ramalho A. Abrasive wear resistance of WC-based composites, produced with Co or Ni-rich binders. *Wear*, 2021, vol. 482-483, article number 203924. DOI: [10.1016/j.wear.2021.203924](https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203924).
- Santos R.F., Ferro Rocha A.M., Bastos A.C., Cardoso J.P., Rodrigues F., Fernandes C.M., Sacramento J., Ferreira M.G.S., Senos A.M.R., Fonseca C., Vieira M.F., Malheiros L.F. The effect of Cr content on the corrosion resistance of WC-Ni-Cr-Mo composites. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2021, vol. 95, article number 105434. DOI: [10.1016/j.ijrmhm.2020.105434](https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2020.105434).
- Santos R.F., Ferro Rocha A.M., Bastos A.C., Cardoso J.P., Rodrigues F., Fernandes C.M., Sacramento J., Ferreira M.G.S., Senos A.M.R., Fonseca C., Vieira M.F., Malheiros Luís F. Microstructural characterization and corrosion resistance of WC-Ni-Cr-Mo composite – The effect of Mo. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2020, vol. 86, article number 105090. DOI: [10.1016/j.ijrmhm.2019.105090](https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2019.105090).
- Wang D., Zhang B., Jia Ch., Gao F., Yu Yu., Chu K., Zhang M., Zhao X. Influence of carbide grain size and crystal characteristics on the microstructure and mechanical properties of HVOF-sprayed WC-CoCr coatings. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2017, vol. 69, pp. 138–152. DOI: [10.1016/j.ijrmhm.2017.08.008](https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2017.08.008).
- Chivavibul P., Watanabe M., Kuroda S., Shinoda K. Effects of carbide size and Co content on the microstructure and mechanical properties of HVOF-sprayed WC-Co coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2007, vol. 202, no. 3, pp. 509–521. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2007.06.026](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.06.026).
- Yuan J., Ma Ch., Yang Sh., Yu Zh., Li H. Improving the wear resistance of HVOF sprayed WC-Co coatings by adding submicron-sized WC particles at the splats' interfaces. *Surface and Coatings Technology*, 2016, vol. 285, pp. 17–23. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2015.11.017](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.11.017).
- Ma N., Guo L., Cheng Zh., Wu H., Ye F., Zhang K. Improvement on mechanical properties and wear resistance of HVOF sprayed WC-12Co coatings by optimizing feedstock structure. *Applied Surface Science*, 2014, vol. 320, pp. 364–371. DOI: [10.1016/j.apsusc.2014.09.081](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.09.081).
- Katranidis V., Gu S., Allcock B., Kamnis S. Experimental study of high velocity oxy-fuel sprayed WC-17Co coatings applied on complex geometries. Part A: Influence of kinematic spray parameters on thickness, porosity, residual stresses and microhardness. *Surface and Coatings Technology*, 2017, vol. 311, pp. 206–215. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2017.01.015](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.01.015).
- La Barbera-Sosa J.G., Santana Y.Y., Moreno E., Cuadrado N., Caro J., Renault P.O., Le Bourhis E.Le., Staia M.H., Puchi-Cabrera E.S. Effect of spraying distance on the microstructure and mechanical properties of a Colmonoy 88 alloy deposited by HVOF thermal spraying. *Surface and Coatings Technology*, 2010, vol. 205, no. 7, pp. 1799–1806. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2010.01.017](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.01.017).
- Wang Q., Zhang Sh., Cheng Y., Xiang J., Zhao X., Yang G. Wear and corrosion performance of WC-10Co4Cr coatings deposited by different HVOF and HVAF spraying processes. *Surface and Coatings Technology*, 2013, vol. 218, pp. 127–136. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2012.12.041](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.12.041).
- Varis T., Suhonen T., Jokipii M., Vuoristo P. Influence of powder properties on residual stresses formed in high-pressure liquid fuel HVOF sprayed WC-CoCr coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2020, vol. 388, article number 125604. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2020.125604](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125604).
- Santana Y.Y., La Barbera-Sosa J.G., Staia M.H., Lesage J., Puchi-Cabrera E.S., Chicot D., Bemporad E. Measurement of residual stress in thermal spray coatings by the incremental hole drilling method. *Surface and Coatings Technology*, vol. 201, no. 5, pp. 2092–2098. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2006.04.056](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.04.056).
- Krylova S.E., Plesovskikh A.Yu., Kurnoskin I.A., Tavtilov I.Sh. Influence of heat treatment on the structure and properties of the tungsten-containing coating of the working part of oil and gas equipment. *Chernye metally*, 2022, no. 12, pp. 36–42. DOI: [10.17580/chm.2022.12.05](https://doi.org/10.17580/chm.2022.12.05).
- Plesovskikh A.Yu., Krylova S.E., Oplensin S.P. Import-substituting technology for manufacturing parts of the oil and gas industry with the application of wear-resistant coatings based on tungsten. *Vestnik sovremennykh tekhnologiy*, 2019, no. 2, pp. 9–14. EDN: [WJOBJF](https://elibrary.ru/wjobjf).
- Plesovskikh A.Y., Krylova S.E., Oplensin S.P., Kurnoskin I.A. Import-substituting technology for manufacturing parts of the oil and gas industry with the application of tungsten based wear-resistant coatings. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 38, part 4, pp. 1595–1598. DOI: [10.1016/j.matpr.2020.08.161](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.161).

The study of the structure and properties of a wear-resistant gas-thermal coating containing tungsten

© 2023

*Aleksey Yu. Plesovskikh**, postgraduate student
*Svetlana E. Krylova*¹, Doctor of Sciences (Engineering), Professor
Orenburg State University, Orenburg (Russia)

*E-mail: plesovskikh@tehnno-oren.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5303-9780>

Received 14.02.2023

Accepted 08.05.2023

Abstract: The paper presents the results of reverse engineering including metallographic, mechanical, and engineering-technical studies of used rods of a compressor produced by the Dresser-Rand company (Siemens, Germany). The study established that the original product is made of AISI 4140 steel with a working coating based on tungsten carbide applied to a depth of 0.2 mm by the HVOF method. The paper contains the results of the development of an import-substituting technological process for producing a wear-resistant powder coating of the Ni–Cr–B–WC system applied by cold gas flame spraying on the surface of a critical unit of compressor equipment in the oil and gas industry. Microanalysis identified that the sprayed spherical WC particles are evenly distributed in the nickel bond without the formation of free cavities at the lamella boundary, retain the size identical to the original powder composition upon the high-speed collision with the substrate, and minimize the level of residual mechanical stresses in the surface layer. The study shows that the sprayed coating has a high microhardness (the bases – 700 HV_{0.1}, WC – up to 2000 HV_{0.1}), which ensures high wear resistance during operation of the rod in a friction pair. A comparative analysis of the tribological properties of the coatings showed that when changing the shape, particle size distribution, and percentage ratio of tungsten carbide from 20 to 70 % in the nickel matrix, the overall wear resistance of the coating equivalently increases. The authors concluded on the possibility of manufacturing an import-substituting product using the gas flame spraying technology with metallurgical powder compositions containing tungsten. The authors developed an industrial technology for applying a wear-resistant coating on the working surface of a rod made of AISI 4140 steel. The paper presents the results of the analysis of the stress state of a material with a coating produced using the developed technology in comparison with the original product. In the product obtained by the experimental technology, in the process of applying the coating and its subsequent mechanical processing, uniform residual mechanical stresses are formed that do not exceed the value of the difference in the principal mechanical stresses. The paper presents the results of the study obtained both on standard samples and on a pilot part.

Keywords: reverse engineering; compressor rod; cold gas flame spraying; wear-resistant tungsten-based coating; tribological properties; residual mechanical stresses.

For citation: Plesovskikh A.Yu., Krylova S.E. The study of the structure and properties of a wear-resistant gas-thermal coating containing tungsten. *Frontier Materials & Technologies*, 2023, no. 2, pp. 89–101. DOI: 10.18323/2782-4039-2023-2-64-4.