

УДК 378(063)

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЗОТИРОВАННОГО ХРОМА И ФЕРРОХРОМА В КАЧЕСТВЕ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ

**Завьялов Владимир Александрович**, аспирант, направление подготовки 22.06.01 Технологии материалов, Оренбургский государственный университет, Оренбург  
e-mail: Zavyalov.orस्क@yandex.ru

Научный руководитель: **Крылова Светлана Евгеньевна**, доктор технических наук, доцент, профессор научно-образовательного центра новых материалов и перспективных технологий, Оренбургский государственный университет, Оренбург  
e-mail: krilova27@yandex.ru

**Аннотация.** Представлены результаты апробирования технологии нанесения азотированного хрома и феррохрома на поверхность деталей нефте-газовой отрасли методом холодного геотермического напыления (ХГТН). Приведен анализ микроструктуры полученного покрытия. Установлены оптимальные режимы напыления. Выполнен сравнительный анализ показателей твердости и микротвердости при использовании различных порошковых композиций.

**Ключевые слова:** холодное газотермическое напыление, азотированный хром, феррохром, многокомпонентные порошковые композиции, адгезия, коррозионностойкие покрытия.

**Для цитирования:** Завьялов В. А. Использование азотированного хрома и феррохрома в качестве защитных покрытий в машиностроении // Шаг в науку. – 2025. – № 1. – С. 34–40.

## THE USE OF NITRIDED CHROMIUM AND FERROCHROME AS PROTECTIVE COATINGS IN MECHANICAL ENGINEERING

**Zavyalov Vladimir Alexandrovich**, postgraduate student, training program 22.06.01 Materials Technology, Orenburg State University, Orenburg  
e-mail: Zavyalov.orस्क@yandex.ru

Research advisor: **Krylova Svetlana Evgenyevna**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Scientific and Educational Center for New Materials and Advanced Technologies, Orenburg State University, Orenburg  
e-mail: krilova27@yandex.ru

**Abstract.** The results of testing the technology of applying nitrided chromium and ferrochrome to the surface of oil and gas industry parts using the cold geothermal spraying (CGTS) method are presented. The microstructure of the resulting coating is analyzed. Optimal spraying modes are established. A comparative analysis of hardness and microhardness indices is performed using various powder compositions.

**Key words:** cold thermal gas spraying, nitrided chromium, ferrochrome, multicomponent powder compositions, adhesion, corrosion-resistant coatings.

**Cite as:** Zavyalov, V. A. (2025) [The use of nitrided chromium and ferrochrome as protective coatings in mechanical engineering]. *Shag v nauku* [Step into science]. Vol. 1, pp. 34–40.

Нефтегазовая отрасль в России является одной из ключевых отраслей экономики, от ее состояния зависит стратегическое преимущество страны на международном рынке. Для успешного развития данной сферы необходимо решить ряд вопросов, одним из которых является производство эффективного, ремонтпригодного оборудования, включая технологии его восстано-

вительного ремонта и изготовления, с учетом стоимости готового изделия ниже зарубежных аналогов.

Опыт работы предприятий сервисного машиностроения показывает, что чаще всего потребность в восстановлении, изготовлении испытывают детали динамического оборудования сложной геометрии, изготовленных из легированных сталей, чаще в им-



портном исполнении. Известно множество методов получения защитных покрытий, одним из которых является холодное газотермическое напыление (ХГТН), что позволяет упростить предварительную подготовку деталей и обеспечить коррозионную стойкость и износостойкость поверхности, что согласно имеющимся исследованиям, является достаточным для работы детали в условиях агрессивных сред, комбинированного нагружения и изнашивания, в том числе, это справедливо для деталей насосно-компрессорного оборудования, таких как рабочие колеса, роторы, колечатые валы, корпуса насосов и др. Однако типовые технологии газотермического напыления имеют ряд недостатков, связанных с образованием таких дефектов, как пористость, потеря легирующих элементов и трещины после механической обработки [6].

В данной работе в качестве исходных материалов для получения защитных покрытий методом ХГТН, использовали порошковые композиции с Новотроицкого завода хромовых соединений, представленные

порошками марок ФХН-8 и ХН-13, изготовленные по металлургической СВС-технологии, предназначенные для формирования защитных покрытий. В исходном виде представляют собой композиции, преимущественно состоящие из смеси высокотвердых частиц в виде CrN, Cr<sub>2</sub>N, (Cr,Fe)<sub>2</sub>N и Fe с колотой морфологией частиц и многогранной формой кристаллов [1; 2].

На первом этапе работы проводили анализ гранулометрического состава, для извлечения крупных частиц, которые могут критично повлиять на работоспособность оборудования, используемого для нанесения покрытия. В работах авторов [7] приведены исследования влияния фракционного состава на качество и габаритные размеры получаемого покрытия. В связи с этим, для выявления нужной фракции в пределах 40–100 мкм., соответствующей требованиям для выполнения холодного газотермического напыления, – порошковые композиции разделили на аналитических ситах с выделением фракции до 40 мкм; 40–100 мкм и больше 100 мкм.

Таблица 1. Гранулометрическое соотношение порошковых композиций

Марка Фракция (мкм)	ХН-13		ФХН-8	
	Объемная доля, %	Массовая доля, гр.	Объемная доля, %	Массовая доля, гр.
≤ 40	45	2150	12	500
40–100	51	2450	74	3000
≥ 100	4	150	14	5550

Источник: разработано автором

После разделения порошков на фракции проводились исследования химического состава и соотноше-

ния заявленным паспортным показателям. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2. Химический состав порошковых композиций в % по массе

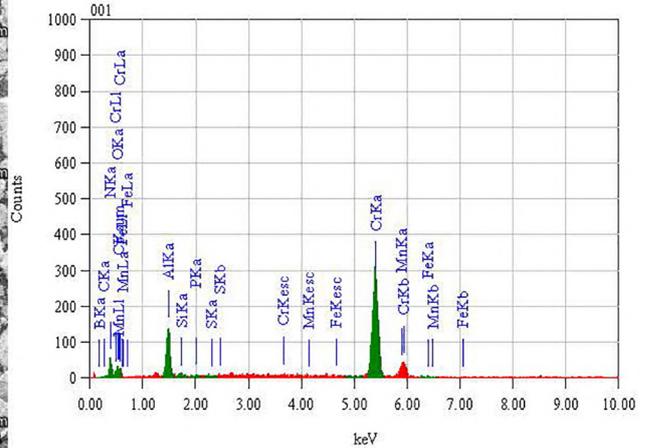
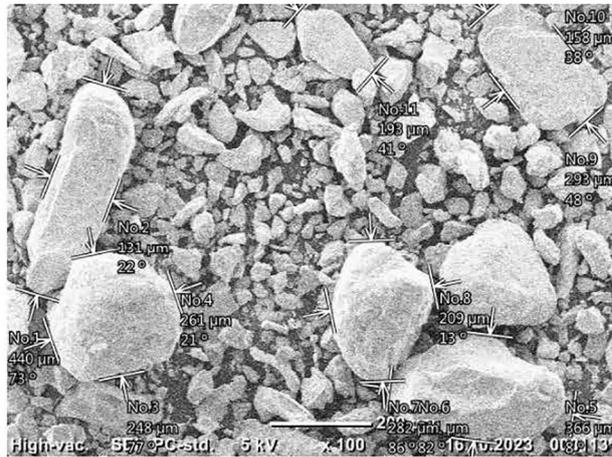
Хим. Элемент Марка порошка	Cr	N	Fe	C	Si	Al	S	P	Σ
	ХН-13 исходный	82,2	11	0,8	0,049	1,85	0,35	0,015	0,01
ФХН-8 исходный	69,2	8,6	19,8	0,045	0,55	0,023	0,019	0,09	98,246
ХН-13 40–100 мкм	83	11	2,99	0,05	1,9	0,46	0,015	0,012	99,887
ФХН-8 40–100 мкм	70	7,99	20	0,05	1	0,83	0,02	0,01	99,9
Заявленный ХН-13	≥ 75	13	11,02	0,05	0,4	0,5	0,015	0,01	100
Заявленный ФХН-8	≥ 60	8,0	30,1	0,15	1,5	0,2	0,02	0,03	100

Источник: разработано автором

Исходя из полученных данных, можно подтвердить соответствие заявленным паспортным значениям и правильность обозначения данных порошковых композиций, а также прогнозировать нюансы проведения операции напыления и получение необходимой

морфологии и механических свойств.

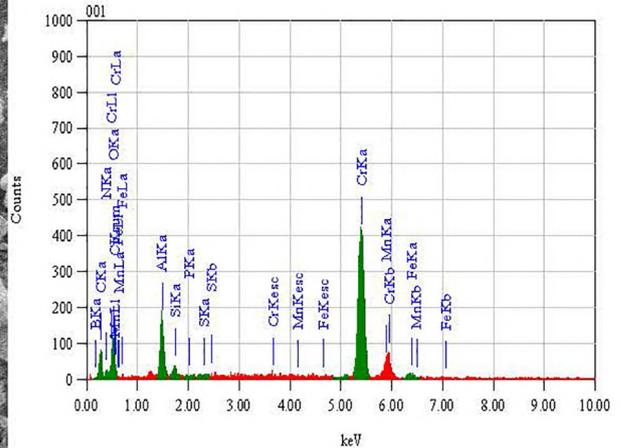
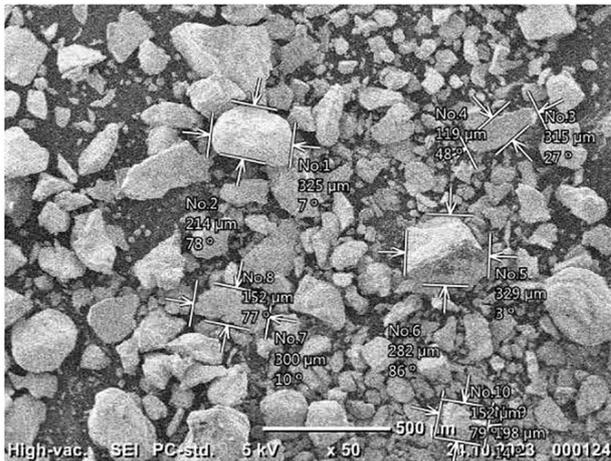
Для детального гранулометрического анализа порошковых композиций был использован электронный микроскоп JEOL JCM-6000 NeoScope.



B	N	O	Al	Si	P	Cr	Mn	Fe
16.77 %	45.99 %	8.74 %	6.59 %	0.13 %	0.11 %	20.23 %	1.31 %	0.12 %

Рисунок 1. Электронно-микроскопическое изображение с микрорентгенограммой порошка азотированного хрома марки ХН-13 в исходном состоянии, фракцией до 0,315 мм

Источник: разработано автором



B	C	N	O	Al	Si	Cr	Mn	Fe
14.11 %	29.02 %	23.74 %	22.80 %	1.76 %	0.2 %	7.59 %	0.5 %	0.28 %

Рисунок 2. Электронно-микроскопическое изображение с микрорентгенограммой порошка азотированного хрома марки ФХН-8 в исходном состоянии, фракцией до 0,315 мм

Источник: разработано автором

Была выявлена неоднородность геометрических параметров в порошковой композиции. Частицы порошков неоднородны и имеют многогранную форму. Можно сказать, что фракции порошковых композиций неоднородны в пределах каждой отдельной частицы и состоят из участков, обогащенных или обедненных содержанием хрома. Анализ размеров частиц показал, что их распределение неравномерно во всем объеме порошковых композиций (рисунок 1, 2). Такое распределение обусловлено многократной пластической деформацией частиц, их циклическими конгломерациями, и разрушением, вследствие чего увеличивается доля как мелкой, так и крупной фракции.

Методом электронной растровой микроскопии и гранулометрического анализа выявлена неоднородность геометрических параметров и гранулометрического состава исходных порошковых материалов фракцией до 0,315 мм. В составе идентифицированы как крупнокусковые фракции, размер отдельных граней которых составляет более 400 мкм (4–14%), так и пылевидная составляющая размером 5–40 мкм (12–45%).

Для качественного нанесения покрытия порошки перед применением подвергались сушке и прокаливанию для удаления излишек влаги в композиции, которая усугубляет сыпучие свойства порошка. Сушка осуществлялась в печи при температуре 200 °С с выдержкой 1 час.

Напыление осуществляли с применением многоцелевой горелки газопламенного напыления Castodyn DS 8000 в 10–15 проходов при температуре детали не более 150 °С, линейная скорость вращения заготовки 125 об/мин, давление ацетилена 0,7 бар, давление кислорода 4,0 бар. Порошковая смесь подавалась из вертикально установленного питателя за счет сил тяжести, плавилась в пламени горелки, и переносилась сжатым воздухом на напыляемую поверхность транспортирующим газом, при расходе кислорода 5 л/ч, ацетилена 4 л/ч. Напыление проводили до достижения толщины покрытия 0,6–1 мм, после чего напыляемую поверхность подвергали шлифованию и полированию на металлообрабатывающем оборудовании с применением интенсивного охлаждения [4; 5].

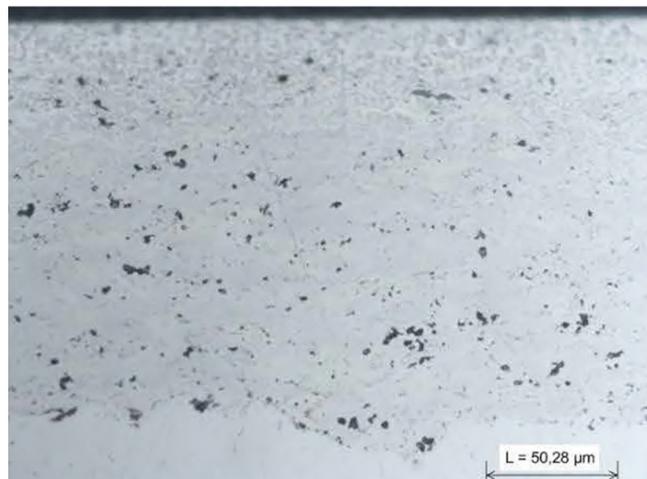


Рисунок 3. Распределение пористости на образце покрытия ФХН-8 (40–100 мкм)

Источник: разработано автором

Оптическая металлография покрытия, полученного методом ХГТН порошком ФХН-8, фракцией 40–100 мкм, показала: покрытие имеет неоднородное пористое строение, присутствуют крупные включения непластифицированных нитридов хрома и феррохрома, от которых расходится сетка микротрещин, железо пластифицируется хорошо, формирует lamellarную структуру с включениями более дисперсных нитридных включений и окислами. После полирования и травления микрошлифа толщина покры-

тия 0,2–0,4 мм [3].

Для анализа распределения поверхностной твердости покрытий, полученных ХГТН, после измерений была сформирована сравнительная таблица (таблица 3) поверхностной твердости в соответствии с картой замеров, представленной на рисунке 4. В таблицах представлены усредненные данные по результатам 3-х замеров, в соответствии с требованиями ГОСТ 9013-59 и ГОСТ 9450-76.

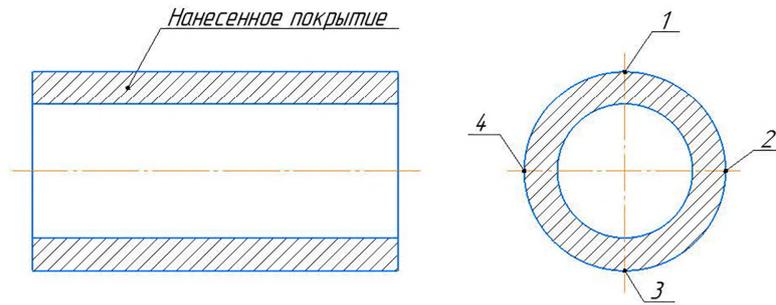


Рисунок 4. Карта замера поверхностной твердости  
 Источник: разработано автором

Таблица 3. Замеры поверхностной твердости (HRC)

Марка / № замера	1	2	3	4
ФХН-8 (исходный)	23,4	22,2	21,1	20,6
ФХН-8 (40–100 мкм)	23,4	20,2	20,6	20,1
ХН-13 (исходный)	26,1	24,8	21,8	21,3
ХН-13 (40–100 мкм)	24,1	23,5	22,7	21,7

Источник: разработано автором

Поверхностный слой, полученный ХГТН, традиционно обладает невысокими значениями твердости. Это объясняется природой формирования газотермических покрытий, основанной на отсутствии жидкофазного механизма формирования покрытия, наличием окислов и пор в поверхностном слое, а также lamellarным характером формирования структуры. Однако в газотермических покрытиях твердость и износостойкость рабочего слоя не являются характеристиками, находящимися в прямой зависимости, а пористость, в случае абразивного износа в маслонасыщенных средах, способствует повышению антифрикционных характеристик. С учетом данных фак-

торов, для нанесения защитных покрытий методом ХГТН следует рассматривать порошок ХН-13 после отбора фракции 40–100 мкм, так как при одинаковых значениях твердости с исходной композицией отсеянная фракция является более технологичной для нанесения (не засоряет сопло).

Также были определены сводные значения изменения микротвердости по направлению от напыленной поверхности к сердцевине основного металла образца шагом 0,3 мм. Схема выполнения замеров представлена на рисунке 5. Данные по микротвердости представлены в таблице 4

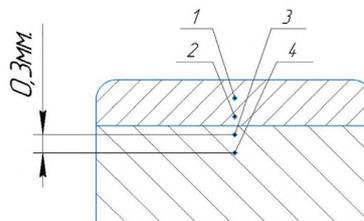


Рисунок 5. Карта замера микротвердости  
 Источник: разработано автором

Таблица 4. Замеры изменения микротвердости по толщине покрытия (HV)

Марка / точка замера	1	2	3	4
ФХН-8 (исходный)	–			
ФХН-8 (40–100 мкм)	161,2	172,1	346,4	341,7
ХН-13 (исходный)	–			
ХН-13 (40–100 мкм)	234,5	277,7	332,3	322,2

Источник: разработано автором

Анализ распределения микротвердости по толщине покрытия, захватывая переходную зону и основной металл, также позволил расставить приоритеты в выборе наиболее упрочненного поверхностного слоя. Согласно распределению твердости и микротвердости к дальнейшему исследованию структурных признаков сформированных покрытий рекомендованы композиции, полученные газотермическим напылением – ХН-13 фракцией 40–100 мкм.

У покрытий, полученных на основе исходных порошков ФХН-8 и ХН-13 фракцией до 0,315 мм, ми-

кротвердость определить не получилось из-за развитой пористости и выкрашивания крупных нитридных включений, нарушающих сплошность покрытия.

Газотермическое напыление – сложный металлургический процесс, который зависит от множества параметров. Малый размер частиц напыляемого материала позволяет назвать его микрометаллургическим, что определяет значимость анализа как самого процесса в малых объемах, так и получаемого покрытия, состоящего из отдельно затвердевших частиц.

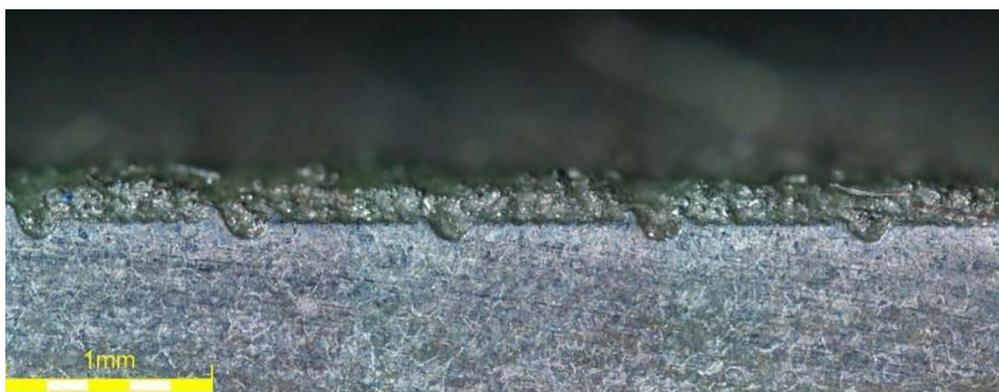


Рисунок 6. Макрофотография образца с покрытием ХН-13 фракцией до 0,315 мм, (X25)

Источник: разработано автором

Из анализа строения поверхностного слоя и структур покрытий, напыленных исходными фракционными составами, видно, что отсутствие сцепления между крупными нитридными включениями и выгорание мелкой фракции (менее 40 мкм) не позволили сформировать эффективного покрытия приемлемой толщины. В обоих случаях толщина покрытия при

одинаковом количестве проходов не превышала 0,2–0,4 мм. Покрытия, напыленные исходными порошками, содержат многочисленные окислы, неоднородны по строению, имеют множество каверн, вырывов и выкрашиваний, что формирует макропористость поверхностного слоя.

#### Литература

1. Зиатдинов М. Х. Развитие теоретических и технологических основ самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) при разработке промышленной технологии производства материалов для сталеплавильного и доменного производств: автореферат дис. ... д-ра техн. наук. – Томск, 2016. – 38 с.
2. Зиатдинов М. Х., Шатохин И. М., Леонтьев Л. И. Технология СВС композиционных ферросплавов.

Часть I. Металлургический СВС процесс. Синтез нитридов феррованадия и феррохрома // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2018. – Т. 61, № 5. – С. 339–347. – <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-5-339-347>.

3. Морунов И. В., Крылова С. Е., Оплеснин С. П. Оценка дефектов реализации процесса лазерной наплавки в промышленных условиях // Уральская школа молодых металлургов : материалы XVIII Международной научно-технической Уральской школы-семинара металлургов – молодых ученых, Екатеринбург, 21–23 октября 2017 года. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, 2017. – С. 21–26.

4. Conde A., et al. (2006) Characterization of corrosion and wear behaviour of nanoscaled e-beam PVD CrN coatings. *Surface and Coatings Technology*. Vol. 201(6), pp. 2690–2695. – <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.05.013>. (In Eng.).

5. Chen W., et al. (2015) Investigation on microstructures and mechanical properties of AlCrN coatings deposited on the surface of plasma nitrocarburized cool-work tool steels. *Vacuum*. Vol. 121, pp. 194–201. – <http://dx.doi.org/10.1016/j.vacuum.2015.08.021>. (In Eng.).

6. Oplesnin S. P., Krylova S. E., Goltypin M. I. (2018) Influence of gas-powder laser cladding's technological parameters on structural characteristics of corrosion-resistant steels' restored surface layer. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 327. Is. 4. – <http://doi.org/10.1088/1757-899X/327/4/042058>. (In Eng.).

7. Patent US6248149 B1. Hardfacing composition for earth-boring bits using macrocrystalline tungsten carbide and spherical cast carbide / A. J. Massey, J. L. Overstreet. Publ. 19.06.2001, 6 p. (In Eng.).

Статья поступила в редакцию: 21.06.2024; принята в печать: 27.02.2025.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.