

## ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА ГОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

*Суан Хынг Нгуен, Новикова А.Д., Мнацаканян В.У.*

*Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва*

**Ключевые слова:** горные машины, коррозия, ремонт, холодное газодинамическое напыление, коррозионностойкие морская вода покрытий, режимы напыления, экспериментальные исследования, образцы покрытий, морская вода.

**Аннотация.** Обоснована целесообразность применения холодного газодинамического напыления (ХГН) для защиты элементов горного оборудования от коррозии при его эксплуатации в условиях влажного тропического климата и повышенной температуры окружающей среды, а также при освоении морских месторождений твердых полезных ископаемых. Представлены результаты экспериментальных исследований, на основе которых выявлены составы покрытий, имеющих высокую сопротивляемость коррозии в морской воде при повышенной температуре окружающей среды, описаны особенности и достоинства процесса ХГН. Представлена методика подготовки экспериментальных образцов и технологические условия формирования защитных покрытий, выбранных для исследования. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании горных машин, предназначенных для добычи ТПИ из недр Мирового океана, так как защита от коррозии основных рабочих органов такого оборудования позволит существенно повысить его ресурс и снизить расходы на ремонт горной техники.

## INCREASING THE RESOURCE OF MINING EQUIPMENT USING PROTECTIVE COATINGS

*Xuan Hung Nguyen, Novikova A.D., Mnatsakanyan V.U.*

*National Research Technological University «MISIS», Moscow*

**Keywords:** mining machines, corrosion, repair, cold gas-dynamic spraying, corrosion-resistant coatings, spraying modes, experimental studies, coating samples, seawater.

**Abstract.** The expediency of using cold gas-dynamic spraying (CGS) to protect elements of mining equipment from corrosion during its operation in a humid tropical climate and elevated ambient temperature, as well as during the development of offshore fields is substantiated. The results of experimental studies are presented, based on which the compositions of coatings with high corrosion resistance in seawater at elevated ambient temperature are identified, the features and advantages of the CGS process are described. The method of preparation of experimental samples and technological conditions for the formation of protective coatings selected for the study are presented. The results of the study can be used in the development of mining machines designed to extract TPI from the depths of the World Ocean, since corrosion protection of the main working bodies of such equipment will significantly increase its resource and reduce the cost of repairing mining equipment.

### Введение

Эффективность освоения месторождений полезных ископаемых во многом определяется уровнем надежности и техническим состоянием применяемой горной техники, которые обеспечиваются на этапах изготовления, технического обслуживания и ремонта горных машин, а также интенсивностью обновления машинного парка и его модернизацией.

Тяжелые условия эксплуатации горного оборудования, обусловленные наличием динамических и циклических нагрузок, абразивных и агрессивных сред, вызывают интенсивный износ и коррозионные повреждения деталей и узлов, что приводит к снижению ресурса машин и определяет необходимость использовать при их изготовлении передовые материалы и технологии.

В ряде случаев реальный ресурс горных машин отличается от прогнозируемого по причине воздействия различных специфических факторов, обусловленных, например, климатическими особенностями региона, в котором эксплуатируется горная машина или

спецификой окружающей среды. Так, для горной техники, используемой при добыче твердых полезных ископаемых (ТПИ) в районах с тропическим влажным климатом вблизи морей и океанов, а также оборудования, применяемого для освоения морских месторождений, ускоренный износ и снижение ресурса металлоконструкций происходит вследствие наличия в узлах интенсивных коррозионных процессов, протекающих под воздействием морской воды или соляного тумана. Особенно чувствительны к воздействию морской среды сварные соединения, широко применяемые при сборке и монтаже горных машин и комплексов. Коррозионные повреждения деталей приводят к значительным расходам на ремонт горной техники и большим финансовым потерям по причине ее простоев, что особенно значимо при эксплуатации импортной техники. Эти обстоятельства приводят к необходимости изыскания и разработки эффективных технологий защиты металлоконструкций от коррозии при помощи формирования на рабочих поверхностях деталей функциональных покрытий. К числу наиболее перспективных методов создания таких покрытий относится процесс холодного газодинамического напыления (ХГН).

Принимая во внимание перспективы и масштабы научно-проектных работ, проводимых в направлении разработки технологий и создания специализированного оборудования для освоения минеральных ресурсов континентального шельфа и Мирового океана [1-5], а также высокую трудоемкость изготовления и ремонта добычной техники, представляется целесообразным применение коррозионноустойчивых ХГН-покрытий на этапе производства таких машин, что позволит существенно повысить ресурс и эффективность эксплуатации горной техники.

#### **Характеристика метода холодного газодинамического напыления покрытий**

Холодное газодинамическое напыление (ХГН) является одним из перспективных методов формирования защитных покрытий на деталях машин. Сущность процесса и главное его отличие от известных газотермических методов заключается в формировании покрытия с помощью высокоскоростного потока частиц порошковых материалов, находящихся в твердом состоянии (рис.1) [6]. Таким образом, основным энергетическим источником формирования таких покрытий является кинетическая энергия твердых частиц, движущихся со сверхзвуковой скоростью. Высокоскоростная деформация частиц при их соударении с подложкой, приводит к образованию достаточно прочных адгезионных и когезионных связей в пределах 80...100 МПа. Эти физические особенности процесса определили возможность разработки технологий по формированию высокоплотных коррозионно- и жаростойких покрытий [7, 8], а также возможность создания износостойких покрытий на основе квазикристаллов сплавов системы Al-Cu-Fe [9]. Важными особенностями ХГН-процесса являются отсутствие термического влияния на напыляемые частицы и подложку, мобильность и компактность оборудования, простота в обслуживании, возможность восстановления локальных участков, а также хорошая обрабатываемость резанием сформированных покрытий [10]. Важно также отметить, что ХГН-процесс является исключительно российским инновационным продуктом.

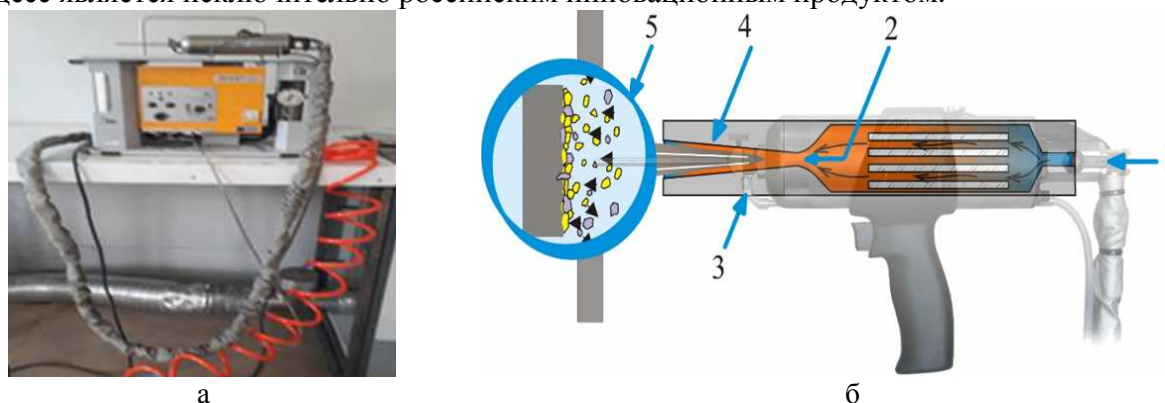


Рис. 1. Установка для холодного газодинамического напыления (а); схема формирования покрытия (б) [10]: 1– подача сжатого воздуха 2 – нагрев воздуха; 3 – подача порошка; 4 – ускорение частиц до сверхзвуковых скоростей; 5 – формирование покрытия

В НИТУ МИСИС функционирует лаборатория холодного газодинамического напыления, в рамках которой проводились данные исследования.

### Методика проведения экспериментальных исследований

Для выявления антикоррозионных свойств покрытий, рекомендуемых для защиты элементов горного оборудования от влажного морского воздуха и морской воды, были подготовлены образцы из низколегированной стали 25Х в виде пластин. Верхняя и нижняя поверхности образцов обрабатывались шлифованием. Одна группа образцов оставалась без покрытий, тогда как на вторую и третью – были нанесены покрытия соответственно на основе порошков следующих составов: 70% Zn+30% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и 55% Al+15% Zn+30% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Образцы покрывались полностью со всех сторон. Толщина покрытий составляла 0,3...0,4 мм.

Для лучшего сцепления покрытий с подложкой (не менее 60 МПа) и исключения влияния прочности сцепления покрытия с материалом пластины на результаты эксперимента, защищаемая поверхность стальных образцов предварительно подвергалась струйно-абразивной очистке при помощи частиц корунда (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

Напыление покрытий выполнялось при помощи установки ДИМЕТ-405 при следующих условиях: давление сжатого воздуха  $P = 0,5...0,6$  МПа, дистанция напыления  $L = 20\div 25$  мм, дисперсность порошковых частиц  $\delta = 35\div 40$  мкм.

Перед проведением эксперимента все образцы взвешивали на аналитических весах, после чего помещали в стеклянные емкости с раствором морской соли (NaCl). Концентрация раствора соли соответствовала ее средней концентрации в морской воде [11] (Южно-Китайского моря) и составляла 32 г/л. В помещении, где проходил эксперимент, поддерживали температуру воздуха 27-28°C, температура солевого раствора составляла 24-25°C. Таким образом, условия эксперимента были приближены к условиям тропического климата Вьетнама. Продолжительность эксперимента – 10 суток.

По завершении эксперимента, образцы очищали от продуктов коррозии, промывали под проточной водой, просушивали и повторно взвешивали.

Скорость коррозии по гравиметрическому (весовому) показателю  $K \left( \frac{\Gamma}{\text{м}^2 \cdot \text{сут}} \right)$  рассчитывали по формуле [12]:

$$K = \frac{\Delta m}{S \cdot \tau}, \quad (1)$$

где  $\Delta m$  – изменение массы образца, г;  $S$  – площадь поверхности образца, м<sup>2</sup>;  $\tau$  – продолжительность воздействия коррозионной среды на образец, сут.

Оценка коррозии по весовому показателю не является достаточно корректной характеристикой ввиду различной плотности испытываемых материалов – стали, цинкового и алюмоцинкового покрытий. В связи с этим также определяли линейную (глубинную) коррозию, переводя потерю массы в линейный показатель коррозии  $h_c$  по формуле [6, 12]

$$h_c = \frac{\Delta m}{s \cdot \rho_c}, \text{ см,}$$

где  $\rho_c$  – плотность покрытия.

С учетом пористости покрытий плотности алюмоцинкового и цинкового покрытий принимали равными 2,7 г/см<sup>3</sup> и 6,5 г/см<sup>3</sup>, соответственно, а плотность стали 7,8 г/см<sup>3</sup>.

### Результаты эксперимента

Массы образцов до и после эксперимента, а также полученные результаты по скорости коррозии для пластин с защитными покрытиями и без них представлены в таблице 1, откуда видно, что наибольшая потеря массы имеет место у образца без покрытия.

Фото пластин в солевом растворе по истечении 10 суток представлено на рисунке 2.

Анализ результатов эксперимента показал, что лучшими защитными свойствами в морской воде обладает покрытие на основе композиции Al+Zn+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, скорость коррозии за сутки с единицы площади для данного покрытия составляет 0,012 г/(м<sup>2</sup>·сут), тогда как для

образца с покрытием на основе порошка Zn+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> составляет 0,685, а в случае образца без покрытия 4,692 г/(м<sup>2</sup>·сут). Величины линейных показателей коррозии покрытий также указывают на лучшую коррозионную стойкость алюмоцинковых покрытий.

Табл. 1. Исходные данные и результаты эксперимента, полученные после выдержки образцов в морской воде в течение 10 суток

Параметр	Образец из стали 25Х без покрытия	Образец с покрытием Zn+Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Образец с покрытием Al+Zn+Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Площадь поверхности образца S, м <sup>2</sup>	0,00178	0,00161	0,00161
Масса образца до испытаний m <sub>0</sub> , г	28,791	29,051	28,454
Масса образца после испытаний m <sub>1</sub> , г	28,7376	29,04	28,4538
Потеря массы, Δm, г	0,0834	0,011	0,0002
Продолжительность испытаний τ, сут.	10	10	10
Скорость коррозии K, г/(м <sup>2</sup> ·сут)	4,692	0,685	0,012
Линейный (глубинный) показатель коррозии h <sub>c</sub> , см	0,00601 (6,01·10 <sup>-3</sup> )	0,00011 (1,1·10 <sup>-4</sup> )	5·10 <sup>-6</sup>

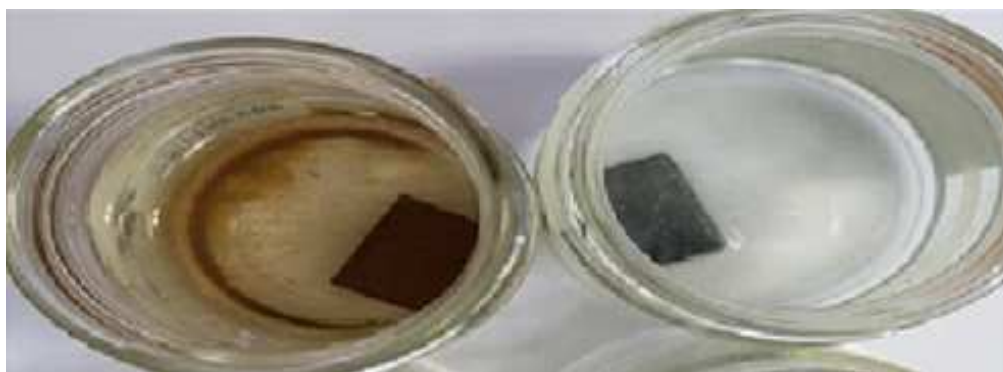


Рис. 2. Фото образцов в морской воде после испытаний в течение 10 суток: слева пластина без покрытия, справа – с покрытием на основе 55% Al+15% Zn+30% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Таким образом, на данном этапе исследования установлено, что покрытия на основе композиции 55% Al+15% Zn+30% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> по сравнению с покрытием порошковым составом 70% Zn+30% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> обеспечивает лучшую антикоррозионную защиту деталей в морской воде.

В настоящее время экспериментальные исследования продолжаются, образцы вновь помещены в раствор соли для оценки изменения скорости коррозии каждые 10 суток. Общее планируемое время испытаний – 60 суток. Результаты испытаний покрытий будут представлены в следующих публикациях, в том числе применительно и к сварным соединениям. Расширены также составы исследуемых покрытий.

### Заключение

Для защиты элементов конструкции оборудования, эксплуатируемого в условиях влажного тропического климата, а также в морской воде целесообразно применять коррозионностойкие алюмоцинковые покрытия (55% Al+15% Zn+30% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), формируемые при помощи холодного газодинамического напыления. Установлено, что данное покрытие обладает лучшей сопротивляемостью коррозии в морской воде по сравнению с покрытием на основе цинка. В то же время цинковые покрытия по сравнению со стальными образцами без покрытий продемонстрировали достаточно высокую коррозионную стойкость.

### Список литературы

1. Добрецов В.Б., Рогалев В.А. Основные вопросы освоения минеральных ресурсов Мирового океана. – СПб.: Международная академия наук экологии, безопасности человека и природы, 2003. – 524 с.
2. Генов Р., Димитров Т., Киров Б. и др. Геология и минеральные ресурсы Мирового океана / Под. ред. Г. Димов. – Варшава: Интерморгео, 1990. – 756 с.

3. Юнгмейстер Д.А., Судариков С.М., Киреев К.А. Обоснование типов глубоководной техники для добычи морских железомарганцевых конкреций // Записки Горного института. – 2019. – Т. 235. – С. 88-95. – DOI: 10.31897/PMI.2019.1.88.
4. Дробаденко В.П., Калинин И.С., Малухин Н.Г. Методика и техника морских геологоразведочных и горных работ. – Волгоград: Издат. дом «Ин-Фолио», 2010. – 352 с.
5. Системы и элементы глубоководной техники подводных исследований / Под. ред. В.С. Ястребова. – Л.: Судостроение, 1981. – 304 с.
6. Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф., Фомин В.М. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика. – М.: Физматлит, 2010. – 536 с.
7. Decker M.K., Neiser R.A., Gilmore D., Tran H.D. Microstructure and Properties of Cold Spray nickel // Thermal Spray 2001: New Surfaces For A New Millennium / Ed. C.C. Berndt, K.A. Khor, E. Lugscheider // ASM International, Materials Park, OH, 2001. – P. 433-439.
8. Ключев О.Ф., Каширин А.И., Буздыгар Т.В., Шкодкин А.В. Оборудование ДИМЕТ для нанесения металлических покрытий при производстве и ремонте деталей машин // Сварочное производство. – 2005. – № 9. – С. 43-47.
9. Патент №2434077 РФ. Сплав на основе квазикристалла системы Al-Cu-Fe для нанесения износостойкого, наноструктурного покрытия / Пескова А.С., Виноградова Т.С., Фармаковский Б.В., Улин И.В., Юрков М.А., Шолкин С.Е., Михеева М.Н. – Заявка №2009142620/02 от 18.11.2009; опубл. 20.11.2011, Бюл. № 32.
10. Каширин А.И., Шкодкин А.В. Газодинамическое напыление металлических покрытий – возникновение метода и его современное состояние // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – №12(36). – С. 22-33.
11. Хорн Р. Морская химия. – М.: Мир, 1972. – 400 с.
12. Петрова Л.Г., Тимофеева Г.Ю., Демин П.Е., Косачев А.В. Основы электрохимической коррозии металлов и сплавов: учеб. пособие / Под общ. ред. Г.Ю. Тимофеевой. – М.: МАДИ, 2016. – 148 с.

#### References

1. Dobretsov V.B., Rogalev V.A. The main issues of the development of mineral resources of the World Ocean. – SPb.: International Academy of Sciences of Ecology, Human Security and Nature, 2003. – 524 p.
2. Genov R., Dimitrov T., Kirov B. etc. Geology and mineral resources of the World Ocean / Ed. G. Dimov. – Warsaw: Intermorgeo, 1990. – 756 p.
3. Yungmeister D.A., Sudarikov S.M., Kireev K.A. Substantiation of types of deep-sea equipment for the extraction of marine ferromanganese nodules // Journal of Mining Institute. 2019, vol. 235, pp. 88-95.
4. Drobadenko V.P., Kalinin I.S., Malukhin N.G. Methods and techniques of marine geological exploration and mining operations. – Volgograd: Publ. house "In-Folio", 2010. – 352 p.
5. Systems and elements of deep-sea technology of underwater research / Edited by V.S. Yastrebov. – L.: Shipbuilding, 1981. – 304 p.
6. Alkhimov A.P., Klinkov S.V., Kosarev V.F., Fomin V.M. Cold gas dynamic spraying. Theory and practice. – M.: Fizmatlit, 2010. – 536 p.
7. Decker M.K., Neiser R.A., Gilmore D., Tran H.D. Microstructure and Properties of Cold Spray nickel // Thermal Spray 2001: New Surfaces For A New Millennium / Ed. C.C. Berndt, K.A. Khor, E. Lugscheider // ASM International, Materials Park, OH, 2001. – P. 433-439.
8. Klyuev O.F., Kashirin A.I., Buzdygar T.V., Shkodkin A.V. DIMET equipment for applying metal coatings in the production and repair of machine parts // Welding production. 2005, no. 9, pp. 43-47.
9. Patent No. 2434077 RU. Alloy based on a quasi-crystal of the Al-Cu-Fe system for applying a wear-resistant, nanostructured coating / Peskova A.S., Vinogradova T.S., Farmakovskiy B.V., Ulin I.V., Yurkov M.A., Sholkin S.E., Mikheeva M.N. – Appl. No.2009142620/02 from 18.11.2009; publ. 20.11.2011, Bul. No. 32.
10. Kashirin A. I., Shkodkin A.V. Gas-dynamic spraying of metal coatings – the emergence of the method and its current state // Strengthening technologies and coatings. 2007, no. 12(36), pp. 22-33.
11. Horn R. Marine chemistry. – M.: World, 1972. – 400 p.
12. Petrova L.G., Timofeeva G.Yu., Demin P.E., Kosachev A.V. Fundamentals of electrochemical corrosion of metals and alloys: textbook / Under the general editorship of G.Yu. Timofeev. – M.: MADI, 2016. – 148 p.

#### Сведения об авторах:

#### Information about authors:

<b>Суан Хынг Нгуен</b> – аспирант	<b>Xuan Hung Nguyen</b> – postgraduate student
<b>Новикова Алена Дмитриевна</b> – аспирант	<b>Novikova Alyona Dmitrievna</b> – postgraduate student
<b>Мнацакянян Виктория Умедовна</b> – доктор технических наук, профессор, научный руководитель	<b>Mnatsakanyan Victoria Umedovna</b> – doctor of technical sciences, professor
artvik@bk.ru	

Получена 07.04.2023