

УДК 621.793

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ В КАЛИЙНОЙ ОТРАСЛИ

*М. Н. КАРПЕЦ*¹, *Ф. И. ПАНТЕЛЕЕНКО*²

¹ОАО «Беларуськалий»

Солигорск, Беларусь

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

UDC 621.793

FEATURES OF THE APPLICATION OF PROTECTIVE THERMAL GAS COATINGS IN THE POTASSIUM INDUSTRY

M. N. KARPETS, F. I. PANTELEENKO

Аннотация. Представлены особенности применения и испытаний защитных коррозионно-стойких покрытий при производстве калийных удобрений. Определены способы увеличения прочности сцепления газотермических покрытий, применяемых в калийной отрасли. Показана эффективность использования самофлюсующихся стальных проволок для увеличения прочности сцепления, износостойкости и коррозионной стойкости покрытий.

Ключевые слова: газотермическое напыление, защитные покрытия, коррозионная стойкость, гиперзвуковая металлизация, прочность сцепления покрытий, структура покрытий.

Abstract. The features of the application and testing of protective corrosion-resistant coatings in the production of potash fertilizers are presented. Methods for increasing the adhesion strength of gas-thermal coatings used in the potash industry are determined. The effectiveness of using self-fluxing steel wires to increase the adhesion strength, wear resistance and corrosion resistance of coatings is shown.

Keywords: thermal spraying, protective coatings, corrosion resistance, hypersonic metallization, adhesion strength of coatings, coating structure.

Введение. Современные тенденции развития калийной отрасли направлены на разработку и выпуск новой продукции, наращивание объемов производства, снижение издержек, связанных с выпуском продукции, что сопровождается переходом на использование более высоких давлений, температур и агрессивных сред. Это в свою очередь приводит к повышению металлоемкости химического оборудования, увеличению затрат на его ремонт или восстановление. Как правило, значительное количество деталей машин при производстве калийных удобрений работают в условиях интенсивного изнашивания и коррозии. По условиям эксплуатации данные детали изготавливают из дорогостоящих высоколегированных хромоникелевых сталей (аустенитного и аустенитно-ферритного классов). Анализируя возможные направления сокращения издержек при эксплуатации оборудования калийной отрасли, можно отметить, что применение защитных коррозионно-износостойких покрытий, нанесенных на менее дорогостоящую основу, в ряде случаев будет более экономичным, чем

применение монолитных высоколегированных сталей. Кроме того, металлические покрытия позволяют восстанавливать изношенные поверхности и, следовательно, снизить потребности в запасных частях.

На сегодняшний день существуют различные способы напыления газотермических покрытий, позволяющих увеличить ресурс деталей машин в несколько раз. Одним из перспективных и экономически предпочтительных способов нанесения металлических покрытий является способ гиперзвуковой металлизации (ГМ) [1], при котором в качестве материалов применяются стандартные сварочные проволоки и проволоки специального назначения.

Следует отметить, что процесс газотермического напыления покрытий с применением проволок значительно отличается условиями плавления и соединения от процессов сварки и наплавки. Напыленное покрытие обладает значительно меньшей прочностью сцепления по сравнению с наплавленными. Исходя из оценки работоспособности деталей с покрытиями, очевидно, что прочность сцепления покрытий с основным металлом является одним из важных факторов, характеризующих возможность применения металлических покрытий.

В связи с этим весьма актуальной является задача подбора соответствующих условиям эксплуатации коррозионно-износостойких материалов и поиск способов увеличения прочности сцепления газотермических покрытий, применяемых в калийной отрасли.

Подбор материалов и исследование особенностей их применения. Для подбора коррозионно-стойких материалов были проведены коррозионные промышленные испытания [2] металлических покрытий из высоколегированных проволок различных структурных классов, нанесенных методом ГМ на стальные пластины марки Ст 3 размерами $80 \times 40 \times 5$ мм. Образцы были размещены в водном растворе KCl и NaCl на технологической линии ОАО «Беларуськалий». По результатам испытаний образцов было установлено, что покрытия из высоколегированных стальных проволок ER316LSi и ER2209, содержащих молибден (2,6 %...3,3 %), являются наиболее коррозионно-стойкими в растворах KCl и NaCl по сравнению с покрытиями из высоколегированных хромистых и хромоникелевых стальных проволок, не содержащих молибден. Рабочий ресурс данных покрытий до начала разрушения составил 2–3 месяца, после которого за счет эрозионного износа от твердой фракции, содержащейся в испытательной среде, они были повреждены (рис. 1).

Кроме коррозионных испытаний покрытий в жидких средах, были проведены промышленные испытания быстроизнашиваемых деталей с защитными покрытиями, эксплуатирующихся в менее агрессивных условиях. Так, например, ресурс стальной втулки защитной перекачивающего технологические среды насоса, упрочненной покрытием, нанесенным методом ГМ с применением высоколегированной проволоки ER316LSi, был увеличен более чем в 2 раза. В качестве защитных и износостойких покрытий не плохо зарекомендовали себя покрытия из проволоки 95X18. Применение покрытий из проволоки Св-08Г2С позволило решить проблемы ограниченности ремонта посадочных подшипниковых мест корпусных элементов редукторов, связанных с ограниченностью

применения сварки и наплавки по причине структурных изменений и образования остаточных деформаций.

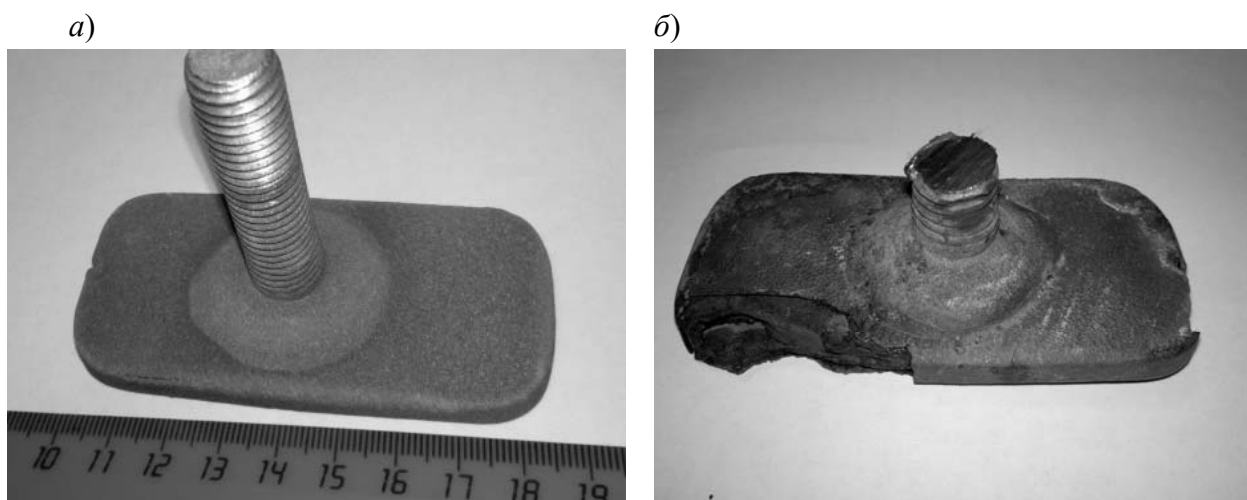


Рис. 1. Образец с покрытием из проволоки ER316LSi: *а* – до испытаний; *б* – после трех с половиной месяцев испытаний

В процессе напыления защитных покрытий было замечено, что подбор оптимальных режимов и техника напыления покрытий являются немаловажным фактором, влияющим на прочность сцепления, пористость и шероховатость покрытий [3].

По результатам испытаний прочности сцепления покрытий и металлографических исследований были определены оптимальные параметры режима напыления покрытий из высоколегированной проволоки ER316LSi. При напылении покрытий на параметрах выше оптимальных наблюдалось уменьшение прочности сцепления покрытий (рис. 2) по причине возникновения чрезмерных остаточных напряжений, увеличение пористости и уменьшение шероховатости покрытий.

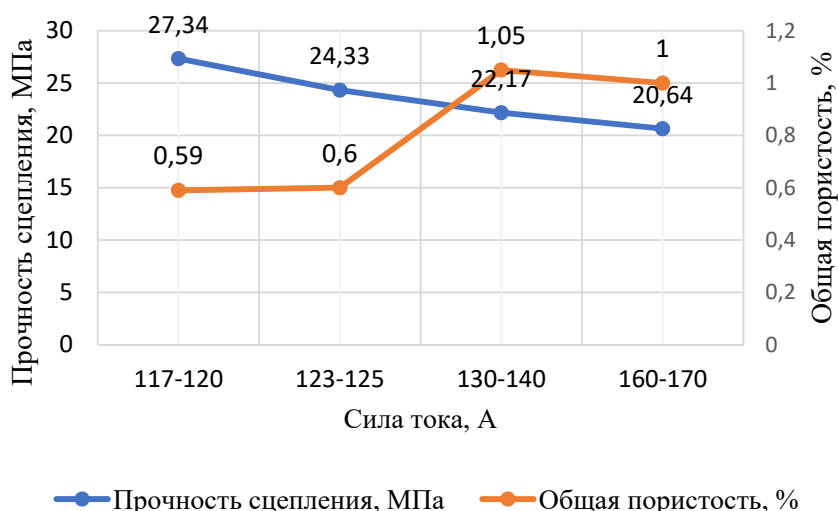


Рис. 2. Изменение прочности сцепления и общей пористости покрытий при изменении параметров напыления

Для повышения прочности сцепления газотермических покрытий необходимо было определить их фактическую прочность. Для этого по специально разработанной методике испытаний были проведены испытания прочности сцепления покрытий из различных проволочных материалов (рис. 3).

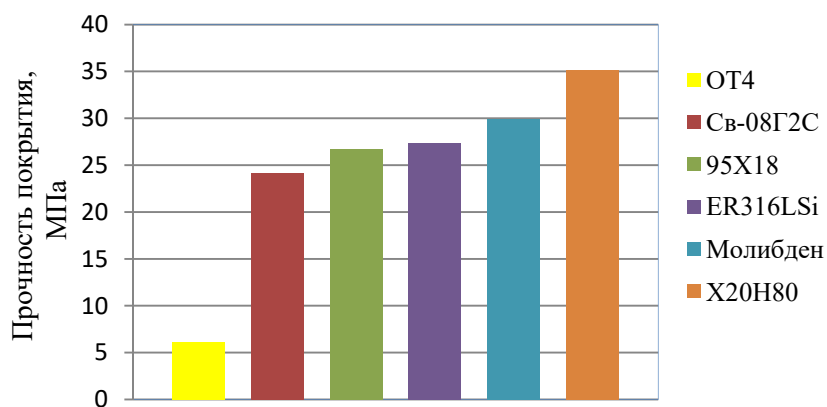


Рис. 3. Прочность покрытий из различных проволочных материалов

Известно, что прочность покрытий пропорциональна их адгезионной и когезионной прочности. Величина адгезионной прочности зависит от механического, физического и химического взаимодействия между частицами и подложкой. Когезионная прочность зависит от взаимодействия частиц между собой, фазового, химического состава и размера зерна напыленного слоя, пористости покрытия.

Разрушение покрытия может происходить, если внешние нагрузки или остаточные напряжения превысят его прочность. В случае превышения адгезионной прочности будет иметь место отслоение покрытия, когезионной прочности – растрескивание или отделение слоев покрытия.

Учитывая, что адгезионная и когезионная составляющие прочности покрытий зависят от различных факторов, для определения способов повышения прочности покрытий необходимо определить их соотношение. С этой целью были выполнены механические испытания и металлографические исследования покрытий из различных материалов [4, 5], по результатам которых были определены доля участия когезионной и адгезионной составляющих прочности покрытий (рис. 4) и составляющая, требующая увеличения.

Для увеличения прочности сцепления покрытий из низколегированной проволоки Св-08Г2С и высоколегированных проволок 95Х18 и ER316LSi требуется увеличение адгезионной составляющей; для покрытий из нихрома, молибдена и титана – когезионной.

Увеличение прочности сцепления покрытий. Учитывая, что в прочности покрытий из наиболее применяемых проволок Св-08Г2С, 95Х18 и ER316LSi преобладает когезионная составляющая, для увеличения прочности покрытий из этих проволок, наряду с механической подготовкой основы, требуется улучшение физического и химического взаимодействия между частицами и подложкой, которое можно достичь путем уменьшения оксидных пленок на

поверхности основы и на поверхности расплавленных капель. В связи с чем в качестве эксперимента были разработаны и применены самофлюсующиеся проволоки [6]. Самофлюсующиеся проволоки представляли собой исходную стальную проволоку марок Св-08Г2С, 95Х18, 316LSi с поверхностным боридным слоем.

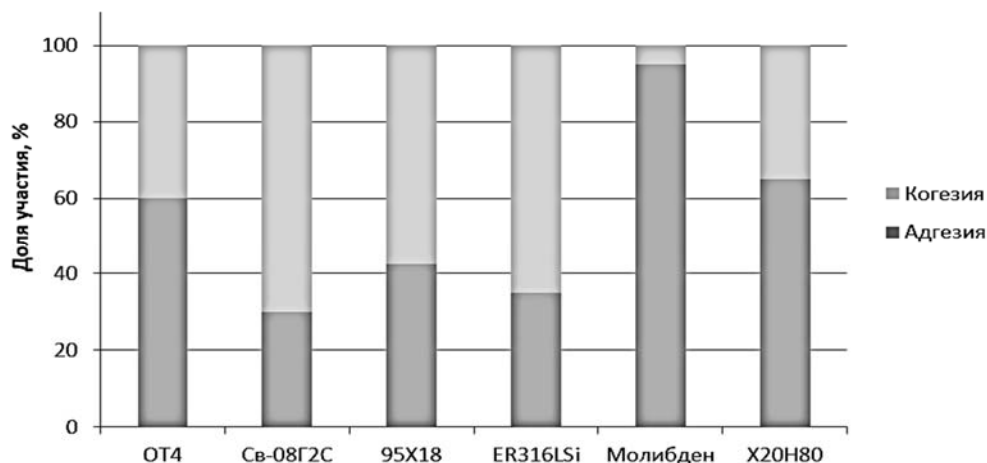


Рис. 4. Доля участия когезионной и адгезионной составляющих в прочности покрытий из различных материалов

По результатам исследования особенностей применения самофлюсующихся проволок и покрытий из них было установлено, что в покрытии из борированной проволоки Св-08Г2С оксидов железа (FeO , Fe_3O_4) не обнаружено (рис. 5), в покрытии из борированных проволок 95Х18 и ER316LSi оксиды железа выявлены в меньшем количестве по сравнению с исходной проволокой.

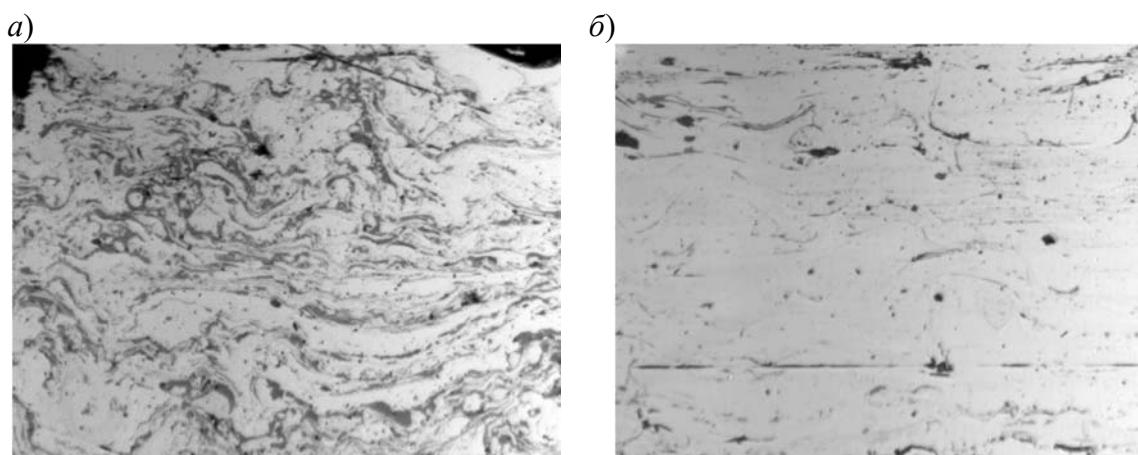


Рис. 5. Микроструктура покрытий из проволоки Св-08Г2С, увеличение $\times 500$: а – исходная проволока; б – борированная проволока

Уменьшение оксидов (FeO , Fe_3O_4) при использовании борированной проволоки привело к увеличению прочности сцепления покрытий по сравнению с исходными проволоками: для Св-08Г2С – на 37 %, для 95Х18 и ER316LSi –

на 3 %. Кроме увеличения прочности покрытий, при использовании борированных проволок Св-08Г2С и 95Х18 было отмечено увеличение микротвердости покрытий, по сравнению с исходной, на 76 % и 22 % соответственно. В то же время по причине структурных изменений микротвердость борированной проволоки ER316LSi уменьшилась на 3 %. Увеличение микротвердости покрытий из борированных проволок Св-08Г2С и 95Х18 позволяет увеличить износостойкость этих покрытий.

Было установлено, что применение самофлюсующихся материалов для упрочнения и восстановления деталей машин является более предпочтительным, чем применение обычной проволоки.

Выводы.

1. Промышленные испытания защитных газотермических покрытий в условиях ОАО «Беларуськалий» показали эффективность их применения. Одним из перспективных и экономически предпочтительных способов нанесения металлических покрытий является гиперзвуковая металлизация.

2. Выбор проволок для защитных покрытий необходимо осуществлять с учетом особенностей их напыления и особенностей строения покрытий из них.

3. Увеличение адгезионной и когезионной составляющих в прочности покрытий может быть достигнуто подбором оптимальных режимов напыления покрытий для каждого применяемого материала, при этом оптимальные режимы не должны способствовать чрезмерному окислению расплавленного материала, выгоранию легирующих элементов и увеличению остаточных напряжений в покрытии.

4. Применение самофлюсующихся стальных проволок с поверхностным борсодержащим слоем для увеличения прочности сцепления, износостойкости и коррозионной стойкости покрытий является перспективным направлением.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Способ гиперзвуковой металлизации и устройство для его осуществления: пат. 024778 / М. А. Белоцерковский, А. А. Дюжев, А. С. Прядко, А. Е. Черепко, В. А. Скворцов, А. В. Сосновский. – Оpubл. 31.10.2016.

2. Исследование коррозионной стойкости покрытий, полученных методом гиперзвуковой металлизации из высоколегированных проволочных материалов, в контакте с агрессивными средами, используемыми при производстве калийных удобрений / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // Горная механика и машиностроение. – 2020. – № 3. – С. 76–85.

3. Влияние режимов гиперзвуковой металлизации на прочность сцепления металлических покрытий / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // Вестн. Полоцкого гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2021. – № 11. – С. 31–36.

4. Определение адгезионной и когезионной прочности металлических покрытий, нанесенных гиперзвуковой металлизацией / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // Наука и техника. – 2021. – № 20 (6). – С. 459–464.

5. **Карпец, М. Н.** Особенности нанесения стальных и титановых покрытий с применением гиперзвуковой металлизации / М. Н. Карпец, А. В. Сосновский // Механика машин, механизмов и материалов ОИМ НАН Беларуси. – 2022. – № 2 (59). – С. 62–66.

6. **Карпец, М. Н.** Особенности применения самофлюсующихся стальных проволок для напыления металлических покрытий / М. Н. Карпец // Горная механика и машиностроение. – 2022. – № 2. – С. 32–39.