

УДК 621.793

М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ, д-р техн. наук, доцент
заведующий лабораторией газотермических методов упрочнения деталей машин¹
E-mail: mbelotser@gmail.com

М.А. ЛЕВАНЦЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент
ведущий научный сотрудник¹
E-mail: levancev@mail.ru

Е.Ф. КОНОВАЛОВА
ассистент
E-mail: elena_konovalova84@mail.ru
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 27.07.2015.

МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ИЗ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ ДЕФОРМАЦИОННЫМ ПЛАКИРОВАНИЕМ

В статье показана возможность использования метода деформационного плакирования для повышения плотности и коррозионной стойкости поверхностных слоев газотермических покрытий. Исследовано влияние упрочняющей обработки газотермических покрытий из стали 40X13 методом деформационного плакирования гибким инструментом аустенитной сталью 10X18H10T. Установлено, что подобная обработка обеспечивает повышение коррозионной стойкости в среде 10 % водного раствора NaCl — на 13...15 %.

Ключевые слова: газотермическое напыление покрытий, деформационное плакирование, гибким инструментом, пористость

Введение. Одним из простых и эффективных способов защиты от коррозии металлоизделий из конструкционных сталей является формирование защитных покрытий. С этой целью широко применяются методы гальваники, газотермического напыления порошками или проволоками, электродуговой металлизации. При этом традиционная схема нанесения покрытия предполагает подготовку поверхности изделия и последующее формирование защитного слоя [1–4].

При традиционной электродуговой металлизации покрытия образуют путем распыления потоком сжатого воздуха расплавленных в электрической дуге проволок из коррозионностойкого металла, например, алюминия или сплавов на его основе. Основным недостатком данной технологии является необходимость нанесения покрытий толщиной более 150 мкм, поскольку более тонкие покрытия имеют сквозную пористость и не обладают соответствующими защитными свойствами. Наличие значительной общей (10–14 %) и сквозной (более трети от общей) пористости характерно для метода традиционной электродуговой металлизации и обусловлено, прежде всего, относительно большим размером (60–120 мкм) распыленных частиц [1, 3].

Газотермическое напыление металлических порошков и последующая пропитка пористого каркаса покрытия анаэробным герметиком обес-

печивает сравнительно неплохую защиту от коррозии изделий из черных металлов [2]. Однако основным недостатком этого метода является низкая теплостойкость анаэробных герметиков (не более 110 °С), что не позволяет эксплуатировать изделия с подобными покрытиями в агрессивных средах с более высокими температурами.

При формировании коррозионностойких покрытий методом гиперзвуковой металлизации (распыление расплавленных в дуге проволок высокоскоростным потоком продуктов сгорания пропано-воздушной смеси) слой образуется частицами размером менее 30 мкм, что обуславливает меньшую общую пористость ($\leq 6\%$) и более высокие защитные свойства при толщине покрытий до 100 мкм [3]. Однако данный метод невозможно использовать при защите деталей, эксплуатирующихся в условиях циклического нагружения, поскольку наличие даже небольшой поверхностной пористости обуславливает развитие усталостных трещин от поверхности вглубь покрытия. Кроме того, накопление агрессивных компонентов во впадинах микрорельефа напыленной поверхности вызывает зарождение и развитие точечной коррозии.

Весьма эффективным, с точки зрения защиты от коррозии является способ, рассмотренный в работе [4], где коррозионностойкое покрытие

получают путем последовательного газотермического напыления основного металлического слоя и затем наружного слоя из коррозионностойкого полимерного термопластичного материала. В данном случае поверхностные поры основного металлического слоя закрываются полимерным коррозионностойким материалом, что обуславливает высокую коррозионную стойкость покрытий. Основным недостатком технологии является узкий температурный диапазон использования формируемых коррозионностойких покрытий, ограниченный тепловой стойкостью наружного полимерного слоя (не более 130 °С). Помимо того, наружный слой имеет низкие механические свойства, что ограничивает область рационального использования технологии.

Цель исследований, результаты которых приведены в данной статье, заключалась в изучении возможности повышения коррозионной стойкости газотермических покрытий, путем их поверхностного модифицирования методом деформационного плакирования гибким инструментом [5].

Методика исследований. В качестве образцов для испытаний использовались стальные (сталь 45) прямоугольные пластинки размером 100×50×6 мм на поверхности которых методами газотермического напыления и деформационного плакирования гибким инструментом последовательно формировали слои из стали мартенситного класса 40X13 и аустенитной стали 10X18Н10Т.

Формирование основного покрытия из проволочной стали 40X13 осуществляли с помощью установок ТЕРКО и АДМ-10, разработанных в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси [6]. Скорость полета распыленных частиц проволоки составляла 400–500 м/с, размер частиц 5–40 мкм. Последующее формирование плакирующего слоя из стали 10X18Н10Т производилось на экспериментальной установке деформационного плакирования вращающейся металлической щеткой с проволочным ворсом из гофрированной проволоки [5], диаметр и ширина щетки составляли соответственно 150 и 15 мм, линейная скорость вращения 35,0...37,0 м/с, диаметр и вылет ворса — 0,25 и 35 мм соответственно. Материал-донор, изготовленный в виде таблетки, прижимали к стальному ворсу с усилием 40 Н и выполняли 3 прохода по поверхности детали. Толщина плакирующего слоя покрытия, из-

меренного с помощью прибора МТЦ-3, составила 3...5 мкм. Шероховатость поверхности по параметру *Ra* не превышала — 0,8...0,9 мкм.

Сплошность покрытий определяли на шлифах с помощью программного комплекса «Autoscan».

Коррозионные испытания проводились в среде 10 % водного раствора NaCl. В качестве основного метода определения коррозионной стойкости исследуемых материалов был выбран весовой метод. Образец выдерживался при комнатной температуре в растворе в течение 50, 70 и 160 ч, после чего проводилась оценка убыли массы.

Результаты и обсуждение. Результаты оценки влияния пористости газотермических покрытий на сплошность слоя, формируемого деформационным плакированием щеткой, представлены в таблице 1.

Сплошность нанесенного слоя определяется по формуле (1):

$$C = \frac{S_i}{S_o}, \quad (1)$$

где S_i, S_o — площадь, покрытая слоем, и общая площадь образца соответственно.

При решении задач, когда имеются лишь экспериментальные данные, с определенным приближением можно получить эмпирическую формулу, которая может быть использована для дальнейшего моделирования процесса. Для этого может быть использована встроенная функция «Линия тренда» программы Microsoft Office Excel.

В результате обработки исходных данных были получены следующие эмпирические формулы:

$$y = 1,1x^{-0,09}; \quad (2)$$

$$y = 1,57x^{-0,29}; \quad (3)$$

$$y = 1,27x^{-0,21}, \quad (4)$$

где x, y — соответствуют поверхностной пористости покрытия Π и сплошности плакированного слоя C соответственно.

По полученным формулам были построены графики зависимости изменения сплошности поверхностного слоя от пористости напыленного покрытия при различном размере пор, которые представлены на рисунке 1.

В результате опытным путем было установлено минимальное количество проходов $n_{пр}$ для получения 100 % сплошности плакированного слоя в зависимости от пористости покрытия Π

Таблица 1 — Зависимость сплошности нанесенного слоя C от пористости покрытия Π при различном размере пор

Размер пор 3...18 мкм	Π, %	2,5	4,2	6,0	7,9	10,0	11,5	12,2	14,1	—	—
	C	1,0	0,97	0,96	0,95	0,93	0,92	0,87	0,84	—	—
Размер пор 25...40 мкм	Π, %	4,1	6,0	7,5	8,5	10,0	12,0	13,1	14,2	15,1	—
	C	0,98	0,92	0,90	0,87	0,85	0,77	0,75	0,70	0,65	—
Размер пор 50...100 мкм	Π, %	3,5	4,3	6,1	7,2	8,1	9,4	10,4	11,0	12,1	14,4
	C	0,88	0,86	0,85	0,83	0,82	0,79	0,76	0,71	0,68	0,65

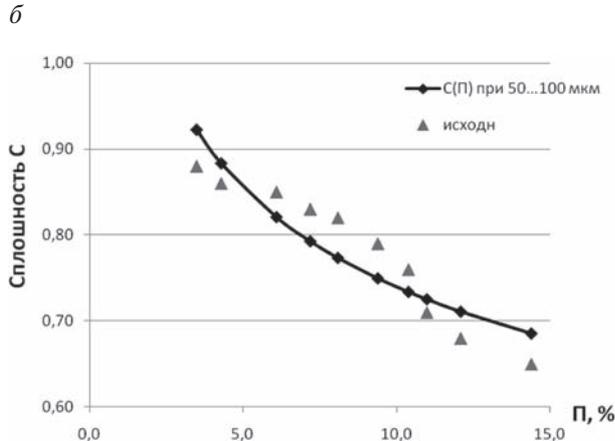
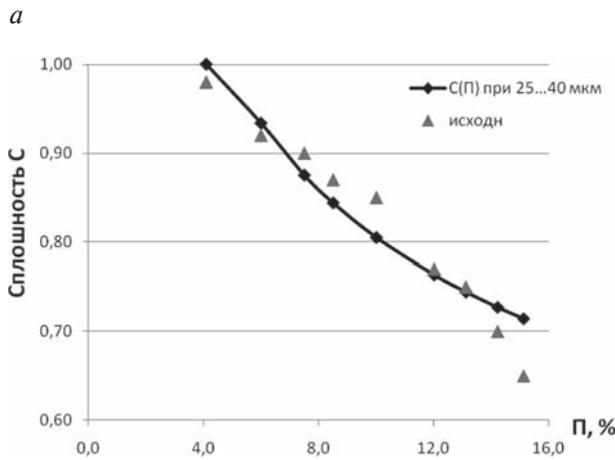
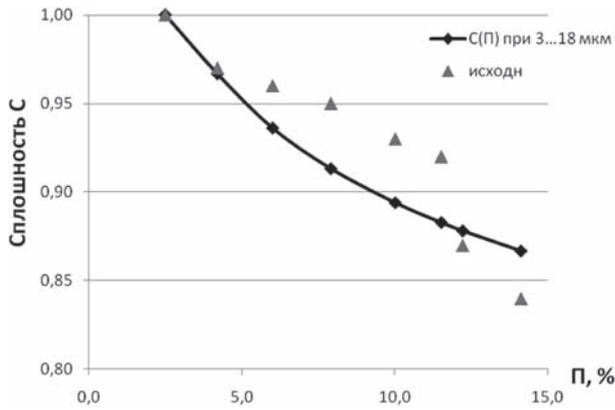


Рисунок 1 — Графики зависимости изменения плотности слоя, полученного деформационным плакированием, от пористости напыленного покрытия: а — при размере пор 3...18 мкм; б — при размере пор 25...40 мкм; в — при размере пор 50...100 мкм

и размера пор. Данные представлены в таблице 2 и на рисунке 2.

Данные по коррозионным испытаниям, представлены на рисунке 3.

Установлено, что плакирование газотермического покрытия из стали 40Х13 сталью 10Х18Н10Т способствует снижению скорости коррозионного растворения поверхностного слоя (рисунок 3, кривая 2). При этом значение скорости коррозии K уменьшается на 15 % (от $K = 0,0096$ мг/см²·ч до $K = 0,0081$ мг/см²·ч).

Таблица 2 — Зависимость количества проходов $n_{пр}$ для получения 100 % плотности в зависимости от пористости и размера пор

Пористость П, %	Размер пор, мкм		
	3–18	25–40	50–100
3,5–5	3	4	4
8–15	4	6	7
15–20	5	6	8

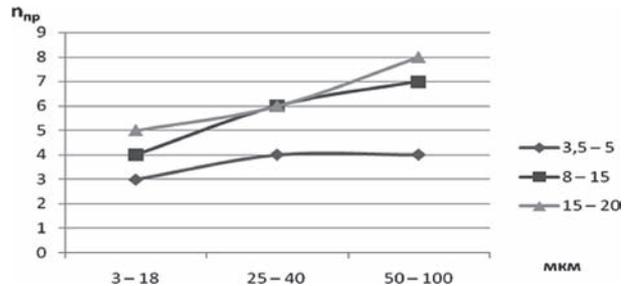


Рисунок 2 — Определение минимального числа проходов для получения 100 % плотности покрытия при деформационном плакировании газотермических покрытий

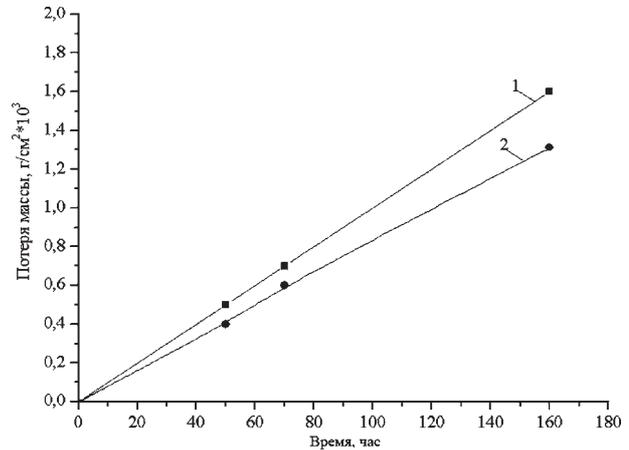


Рисунок 3 — Зависимости величины коррозионного растворения в 10 % водном растворе NaCl покрытия из стали 40Х13 от режима обработки: 1 — исходное состояние; 2 — плакирование сталью 10Х18Н10Т

Выводы. Анализ результатов исследования показал целесообразность использования процесса деформационного плакирования для повышения поверхностной плотности газотермических покрытий, имеющих диаметр пор до 100 мкм и пористость до 22 %. Отмечено, что увеличение пористости вызывает линейное увеличение количества проходов щеткой до получения 100 % плотности поверхностного слоя, наносимого деформационным плакированием.

Установлено, что деформационное плакирование гибким инструментом газотермических покрытий способствует повышению их коррозионной стойкости в среде 10 % водного раствора NaCl, в среднем, на 15 %. Полученные данные могут быть использованы для прогнозной оценки ресурса работоспособности изделий с газотермическими покрытиями, эксплуатируемых в агрессивных средах.

Список литературы

1. Шаров, В.М. Металлизационные покрытия / В.М. Шаров. — Киев: Будівельник, 1981. — 80 с.
2. Гольник, В.Ф. Влияние пропитки на коррозионную стойкость газотермических покрытий / В.Ф. Гольник, З.Г. Ипатова // Новые процессы и оборудование для газотермических и вакуумных покрытий. — Киев: Наук. думка. — 1990. — С. 78–82.
3. Замена гальванического хромирования на технологию гиперзвуковой металлизации при ремонте деталей узлов трения скольжения / П.А. Витязь [и др.] // Ремонт, восстановление, модернизация. — 2010. — № 10. — С. 2–5.
4. Витязь, П.А. Основы нанесения износостойких, коррозионностойких и теплозащитных покрытий / П.А. Витязь, А.Ф. Ильюшенко, А.И. Шевцов. — Минск: Беларус. наука. — 2006. — С. 311.
5. Леванцевич, М.А. Повышение эксплуатационных свойств трибосопряжений нанесением покрытий металлическими щетками / М.А. Леванцевич, Н.Н. Максимченко, В.Г. Зольников // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. — 2005. — № 1. — С. 67–72.
6. Повышение ресурса трибосопряжений активированными методами инженерии поверхности / П.А. Витязь [и др.]. — Минск: Беларус. наука, 2012. — 452 с.

BELOTSEKOVSKIY Marat A., Dr. Techn. Sc., Associate Professor

Head of Laboratory of Gas-Thermal Methods of Hardening of Machine Parts¹

E-mail: mbelotser@gmail.com

LEVANTSEVICH Mikhail A. Cand. Techn. Sc., Associate Professor

Leading Researcher¹

E-mail: levancev@mail.ru

KONOVALOVA Elena F.

Assistant

E-mail: elena_konovalova84@mail.ru

Belarusian National Technical University, Minsk, The Republic of Belarus

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, The Republic of Belarus

Received 27 July 2015

SURFACE MODIFICATION OF THERMAL SPRAYING STAINLESS STEEL COATINGS BY CLADDING DEFORMATION

The article shows the possibility of using the method of cladding deformation to increase the density and corrosion resistance of the surface layers of thermal spray coatings. The effect of the hardening treatment of thermal coatings of 40H13 steel strain by plating flexible tool austenitic 10H18N10T steel was investigated. It has been found that this treatment provides improved corrosion resistance in an environment of 10 % NaCl aqueous by 13... 15 %.

Keywords: gas-thermal spraying coatings, cladding deformation, flexible tool, porosity

References

1. Sharov V.M. *Metallizacionnye pokrytija* [Metallized coating]. Kiev, Builder, 1981. 80 p.
2. Gol'nik V.F., Ipatova Z.G. Vlijanie propitki na korrozionnuju stojkost' gazotermicheskikh pokrytij [The influence of impregnation on corrosion resistance of gas-thermal coatings]. *Novye processy i oborudovanie dlja gazoter-micheskikh i vakuumnykh pokrytij* [New processes and equipment for thermal and vacuum coatings]. Kiev, Scientific thought, 1990, pp. 78–82.
3. Vityaz P.A., Belotserkovsky M.A., Kamko A.I., Prjadko A.S. Zamena gal'vanicheskogo hromirovaniya na tehnologiju giperzvukovoj metallizacii pri remonte detalej uzlov trenija skol'zhenija [Replace galvanic chromium plating technology hypersonic metallization in the repair of parts of friction assemblies of sliding]. *Remont, vosstanovlenie, modernizacija* [Repair, restoration, modernization], 2010, no. 10, pp. 2–5.
4. Vityaz P.A., Il'jushhenko A.F., Shevcov A.I. *Osnovy nanesenija iznosostojkih, korrozionnostojkih i teplozashhitnykh pokrytij* [The basics of applying a wear-resistant, corrosion-resistant and thermal barrier coatings]. Minsk, Belarusian science, 2006. 311 p.
5. Levancevich M.A., Maksimchenko N.N., Zol'nikov V.G. Povyshenie jeksplua-tacionnykh svojstv tribosoprjazhenij naneseniem pokrytij metallichesкими shhetskami [Increase of operational properties of friction units application in indoor metal brushes]. *Vesci Nac. akad. navuk Belarusi. Ser. fiz.-tjehn. Navuk* [News of the Nat. Acad. of Sciences of Belarus. Ser. physics-technical sciences], 2005, no. 1, pp. 67–72.
6. Vityaz P.A., Zhornik V.I., Belotserkovsky M.A., Levancevich M.A. *Povyshenie resursa tribosoprjazhenij aktivirovannymi metodami inzhenerii poverhnosti* [Increased resource of friction units activated methods of surface engineering]. Minsk, Belarusian science, 2012. 452 p.