

УДК 621.793

М.Н. КАРПЕЦ, магистр техн. наукзаместитель начальника лаборатории технической диагностики и наладки¹

E-mail: mail-maxiolis@mail.ru

А.В. СОСНОВСКИЙ, канд. техн. наукведущий научный сотрудник лаборатории газотермических методов упрочнения деталей машин²

E-mail: sosnovskij@inbox.ru

¹ОАО «Беларуськалий», г. Солигорск, Республика Беларусь²Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 06.04.2022.

ОСОБЕННОСТИ НАНЕСЕНИЯ СТАЛЬНЫХ И ТИТАНОВЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ГИПЕРЗВУКОВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ

В настоящее время для восстановления и упрочнения различных изношенных деталей машин широко применяются методы газотермического напыления. В большинстве случаев в качестве материалов для газотермических методов нанесения покрытий применяются металлические и композиционные проволоки. Как правило, металлические покрытия, нанесенные газотермическим напылением, обладают меньшими прочностными характеристиками, чем литые материалы. Важным фактором, характеризующим возможность применения металлических покрытий в различных отраслях промышленности, является их плотность и прочность сцепления (адгезия) покрытий с основным металлом. В данной работе была исследована структура и плотность покрытий, а также прочность сцепления покрытий из стальных и титановой проволоки, нанесенных методом гиперзвуковой металлизации.

Ключевые слова: прочность покрытий, адгезия покрытий, испытания покрытий, гиперзвуковая металлизация, металлические покрытия

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-2-59-62-66>

Введение. Известно, что прочность металлических 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 и химического состава напыленного слоя, размера зерна напыленного слоя, пористости покрытия. В большинстве случаев когезионная прочность покрытия выше адгезионной [1]. 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 [1]. В работе [2] проводились исследования по определению адгезионной и когезионной составляющей прочности покрытий из разных материалов, нанесенных методом гиперзвуковой металлизации. По результатам исследований было установлено, что участие когезионной и адгезионной составляющей прочности покрытий отличается в зависимости от

применяемого материала. Было определено, что в прочности покрытий из высоколегированной проволоки ER316LSi преобладает когезионная составляющая, при которой разрушение в основном происходит по границе покрытие–основа. Для покрытий из нихрома и особенно для покрытий из молибдена преобладающей является адгезионная составляющая, при которой разрушение покрытия проходит не по границе покрытие–основа, а между слоями покрытия. Для увеличения прочности сцепления покрытий из высоколегированной проволоки ER316LSi требуется увеличение адгезионной составляющей. Для покрытий из нихрома и молибдена требуется увеличение когезионной составляющей.

Учитывая широкую номенклатуру изнашиваемых узлов оборудования, работающих в различных условиях, для качественного восстановления существует необходимость в выборе наиболее эффективного метода нанесения покрытий и выборе применяемых материалов. Немаловажным фактором, влияющим на прочность сцепления, пористость и шероховатость покрытий, является выбор оптимальных режимов напыления [3].

Целью данной работы является исследование структуры и плотности покрытий, а также определение прочности сцепления покрытий из стальных и титановой проволоки, нанесенных методом гиперзвуковой металлизации (ГМ).

Подготовка экспериментальных образцов.

Для проведения исследований применялись штифтовые образцы из низкоуглеродистой стали марки Ст3. В качестве материалов для нанесения покрытий применялись: сварочная проволока марки Св-08Г2С диаметром 1,6 мм, проволока марки 95Х18 диаметром 1,6 мм, титановая проволока марки ОТ4, химический состав которых приведен в таблице 1. Выбор метода ГМ обусловлен тем фактом, что данная технология позволяет наносить высокоплотные металлические покрытия, используя в качестве присадочного материала проволочные электроды [4, 5], что значительно дешевле по сравнению с порошками. В процессе ГМ распыление жидкого металла, образующегося в результате теплового воздействия электрической дуги на торцы 2 проволочных электродов, производится струей продуктов сгорания пропано-воздушной смеси. При этом скорость струи на выходе из сопла достигает 1500 м/с при температуре 2200 К, а скорость полета распыляемых частиц, формирующих покрытие, около 500 м/с [6].

Для активации поверхности перед нанесением покрытий рабочая поверхность образцов подвергалась абразивно-струйной обработке смесью, состоящей из корунда (~90 %) грануляцией 250–300 мкм и колотой дроби (~10 %) грануляцией 1,0–1,4 мм, при рабочем давлении сжатого воздуха 0,6 МПа.

Нанесение покрытий на образцы выполнялось на режимах, указанных в таблице 2.

Проведение механических испытаний. Испытания прочности покрытий выполнялись по штифтовому методу на разрывной машине KASONWDW-50 (максимальная разрывная нагрузка 50 кН, погрешность измерений $\pm 0,5$ %). После

напыления минимальная толщина покрытий на образцах составляла 0,4 мм, что является достаточным для оценки прочности сцепления покрытия с основой, используя штифтовой метод [10]. В соответствии с [11] применялись штифты с диаметром 2,0 мм (контактная поверхность 3,14 мм²). Измерение толщины покрытия выполнялось штангенциркулем ШЦ-125 с погрешностью измерений 0,01 мм. Испытаниям подвергали серию из 5 образцов для каждого материала. За результат принимали среднеарифметическое значение (таблица 3).

Из представленных данных можно определить, что наибольшей адгезией обладают покрытия из проволоки марки 95Х18, прочность сцепления которых превышает адгезионные свойства покрытий из проволоки марки Св-08Г2С на 10,5 %, из титановой проволоки — на 338 %. Покрытия из титановой проволоки ОТ4 обладали наименьшей прочностью сцепления. Кроме того, была отмечена значительная хрупкость покрытий из титановой проволоки при подготовке образцов к механическим испытаниям.

Более наглядно результаты испытаний представлены на рисунке 1.

Металлографические исследования образцов. Металлографические исследования выполнялись с использованием микроскопа МИ-1. Для анализа изображений применялось программное обеспечение SIAMS 800. Травление образцов не выполнялось. Микрошлифы представляли собой поперечное сечение штифтового образца после отрыва штифта от покрытия.

По результатам металлографических исследований выявлено, что частицы в покрытии всех образцов имеют сильно деформированную форму (рисунок 2).

Пористость покрытий из исследуемых проволоки составляет:

- Св-08Г2С — до 1,1 %;
- 95Х18 — до 0,8 %;
- ОТ4 — до 38,7 %.

Таблица 1 — Химический состав применяемых проволок [7–9]
Table 1 — Chemical composition of the wires used [7–9]

| Марка проволоки | Массовая доля химических элементов, % | | | | | | | | |
|-----------------|---------------------------------------|-----------|------|-----------|----------|-------|------|---------|-----|
| | Ti | Mn | Cu | C | Si | Ni | Cr | Al | Zr |
| Св-08Г2С | — | 1,80–2,10 | — | 0,05–0,11 | 0,7–0,95 | <0,25 | <0,2 | — | — |
| 95Х18 | <0,2 | <0,8 | <0,3 | 0,96 | <0,8 | <0,6 | 18,5 | — | — |
| ОТ4 | Основа | 0,8–2,0 | — | 0,1 | 0,12 | — | — | 3,5–5,0 | 0,3 |

Таблица 2 — Режимы нанесения покрытий
Table 2 — Coating application modes

| Марка проволоки | Сила тока, А | Напряжение дуги, В | Скорость подачи проволоки, м/мин | Давление сжатого воздуха, МПа | Давление пропан-бутановой смеси, МПа | Дистанция напыления, мм |
|-----------------|--------------|--------------------|----------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|
| Св-08Г2С | 250 | 32 | 4,5 | 0,4 | 0,4 | 100–150 |
| 95Х18 | 200 | 37 | 2,6 | 0,4 | 0,4 | 100–150 |
| ОТ4 | 200 | 39 | 3,0 | 0,4 | 0,4 | 100–150 |

Таблица 3 — Результаты испытаний прочности покрытий
Table 3 — Results of coating strength tests

| Материал покрытия | Толщина покрытия, мм | Разрывное усилие, кН | Прочность покрытия, МПа |
|-------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|
| Св-08Г2С | 0,8–0,9 | 0,076 | 24,20 |
| 95Х18 | 0,8–1,0 | 0,084 | 26,75 |
| ОТ4 | 0,5–0,6 | 0,0192 | 6,11 |

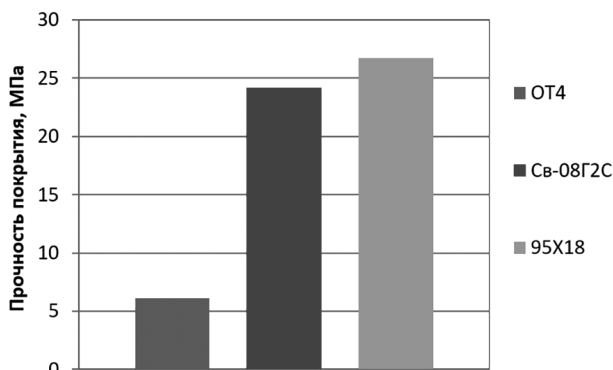


Рисунок 1 — Прочность покрытий из различных проволочных материалов
Figure 1 — Strength of coatings made of various wire materials

Покрытие из титановой проволоки выглядит неплотным, с большим содержанием несплошностей. Учитывая высокую химическую активность титана при нагреве свыше 350 °С и особенно в расплавленном состоянии по отношению к кислороду и азоту воздуха [12] и тот факт, что в процессе напыления пучок расплавленных капель титановой проволоки имел яркое белое свечение, вероятнее всего, покрытие содержит большое количество нитридов титана TiN и оксидных фаз переменного состава TiO_x . Кроме того, отмечается значительная хрупкость покрытий из титановой проволоки при механической подготовке образца к металлографическим исследованиям.

Для определения доли участия когезионной и адгезионной составляющей в прочности покрытий был выполнен металлографический анализ микрошлифа штифтовых образцов. В процессе исследований на микрошлифе были различимы контактные поверхности штифта с остатками покрытия на торцевой поверхности штифта. Доля

участия адгезии и когезии определялась по отношению суммарной длины участков с частицами покрытия, оставшимися на торцевой поверхности штифта после отрыва, а также без них к условной длине торцевой поверхности штифта (таблица 4).

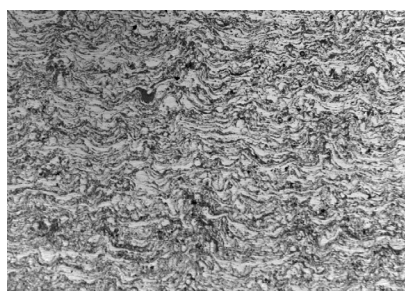
При испытании покрытий из проволоки Св-08Г2С в большинстве случаев преобладает адгезионное разрушение, т. е. отрыв покрытия в основном происходит по границе покрытие–основа. Разрушение покрытий из проволоки 95Х18 проходило как между слоями, так и по границе покрытие–основа, но в большей степени преобладало адгезионное разрушение. Разрушение покрытий из титановой проволоки проходило как между слоями, так и по границе покрытие–основа, но в большей степени преобладало когезионное разрушение.

Выводы. По результатам проведенных исследований можно установить, что участие когезионной и адгезионной составляющей прочности покрытий отличается в зависимости от применяемого материала. Было определено, что в прочности покрытий из проволоки Св-08Г2С и 95Х18 преобладает когезионная составляющая, при которой разрушение в основном происходит по границе покрытие–основа. Для покрытий из титановой проволоки ОТ4 преобладающей является адгезионная составляющая, при которой в большинстве случаев разрушение покрытия проходит не по границе покрытие–основа, а между слоями покрытия. Для увеличения прочности сцепления покрытий из проволок Св-08Г2С и 95Х18 требуется увеличение адгезионной составляющей. Для покрытий из титановой проволоки ОТ4 требуется увеличение когезионной составляющей. Увеличение адге-

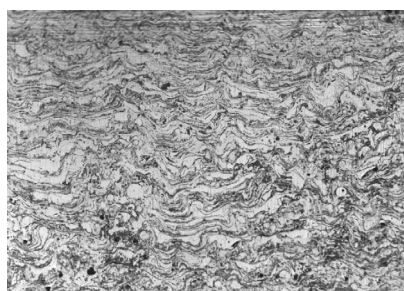
Таблица 4 — Доля участия когезионной и адгезионной составляющей в прочности покрытий из различных материалов

Table 4 — Share of the cohesive and adhesive component in the strength of coatings made of various materials

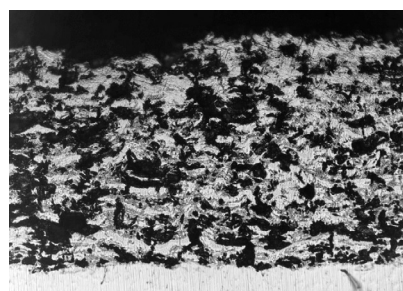
| Марка проволоки | Адгезия, % | Когезия, % |
|-----------------|------------|------------|
| Св-08Г2С | 20–40 | 60–80 |
| 95Х18 | 35–50 | 50–65 |
| ОТ4 | 60–70 | 30–40 |



a



b



c

Рисунок 2 — Структура покрытий, увеличение $\times 200$: a — проволока Св-08Г2С; b — проволока 95Х18; c — титановая проволока ОТ4
Figure 2 — Coating structure, magnification $\times 200$: a — Св-08Г2С (Sv-08G2S) wire; b — 95Х18 (95Kh18) wire; c — titanium wire OT4

зионной и когезионной составляющей 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. В случае напыления титановой проволоки требуется применение дополнительной защиты от взаимодействия расплавленных титановых капель с воздушной атмосферой. Можно предположить, что уменьшение окисления расплавленных капель титановой проволоки можно получить за счет уменьшения дистанции напыления, увеличения скорости расплывающегося потока. Помимо этого, необходимо увеличить грануляцию абразивного материала (корунда), используемого для подготовки поверхности под напыление, для повышения шероховатости подложки.

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что для увеличения прочности сцепления покрытия с основой, а также снижения напряжений в покрытии необходимо использовать промежуточные подслои из материалов, обладающих высокими адгезионными свойствами.

Список литературы

1. Коробов, Ю.С. Анализ свойств газотермических покрытий: учеб. пособие: в 2 ч. / Ю.С. Коробов. — Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2016. — Ч. 2: Оценка параметров покрытий. — 92 с.
2. Определение адгезионной и когезионной прочности металлических покрытий, нанесенных гиперзвуковой металлизацией / Ф.И. Пантелеенко [и др.] // Наука и техника. — 2021. — Т. 20, № 6. — С. 459–464. — DOI: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-459-464>.
3. Влияние режимов гиперзвуковой металлизации на прочность сцепления металлических покрытий / Ф.И. Пантелеенко [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. — 2021. — № 11. — С. 31–36.
4. Устройство для высокоскоростного напыления покрытий (варианты): пат. ВУ 4365 / М.А. Белоцерковский, А.С. Прядко, А.Е. Черепко — Опубл. 30.03.02.
5. Сравнительный анализ физико-механических свойств покрытий, нанесенных способами электродуговой и гиперзвуковой металлизации / Ф.И. Пантелеенко [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. — 2019. — № 4(49). — С. 48–54.
6. Способ гиперзвуковой металлизации и устройство для его осуществления: пат. ЕА 024778 / М.А. Белоцерковский, А.А. Дюжев, А.С. Прядко, А.Е. Черепко, В.А. Скворцов, А.В. Сосновский. — Опубл. 31.10.2016.
7. Проволока стальная сварочная. Технические условия: ГОСТ 2246-70. — Введ. 01.01.1973. — М.: Изд-во стандартов, 1970. — 17 с.
8. Марки стали и сплавы. Сталь марки 95X18 [Электронный ресурс] // Центральный металлический портал. — Режим доступа: http://metallischekiy-portal.ru/marki_metallov/stn/95X18. — Дата доступа: 20.02.2022.
9. Титан и сплавы титановые деформируемые. Марки: ГОСТ 19807-91. — Введ. 01.07.1992. — М.: Изд-во стандартов, 1991. — 9 с.
10. Методы исследований материалов: структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий / Л.И. Тушинский [и др.]. — М.: Мир, 2004. — 384 с.
11. Пантелеенко, Ф.И. Влияние некоторых факторов на особенности испытания прочности сцепления металлических покрытий / Ф.И. Пантелеенко, М.Н. Карпец // Материалы XI Междунар. научно-практической конф. «Инновации в машиностроении» (ИнМаш-2020), Бийск, 22–23 окт. 2020 г. / Алтайский гос. технический ун-т им. И.И. Ползунова, Бийский технологический ин-т (филиал); редкол.: А.Г. Овчаренко. — Бийск, 2020. — С. 283–288.
12. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / под ред. Б.Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1974 — 768 с.

KARPETS Maksim N., M. Sc. in Eng.

Deputy Head of the Laboratory of Technical Diagnostics and Adjustment¹

E-mail: mail-maxiolis@mail.ru

SOSNOVSKY Aleksey V., Ph. D. in Eng.

Leading Researcher of the Laboratory of Gas-Thermal Methods of Machine Components Hardening²

E-mail: sosnovskij@inbox.ru

¹JSC Belaruskali, Soligorsk, Republic of Belarus

²Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 06 April 2022.

FEATURES OF APPLYING STEEL AND TITANIUM COATINGS BY HYPERSONIC METALLIZATION

Currently, methods of thermal spraying are widely used to restore and harden various worn parts of machines. In most cases, metal and composite wires are used as materials for gas-thermal coating applying methods. As a rule, metal coatings applied by thermal spraying have lower strength characteristics than cast materials. An important factor characterizing the possibility of using metal coatings in various industries is their density and adhesion strength of coatings with the base metal. In this paper, the structure and

density of coatings, as well as the adhesion strength of coatings made of steel and titanium wires deposited by hypersonic metallization were studied.

Keywords: coating strength, coating adhesion, coating testing, hypersonic metallization, metal coatings

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-2-59-62-66>

References

1. Korobov Yu.S. *Analiz svoystv gazotermicheskikh pokrytiy. Chast 2. Otsenka parametrov pokrytiy* [Analysis of the properties of gas-thermal coatings. Part 2: Evaluation of coating parameters]. Yekaterinburg, Uralskogo universiteta Publ., 2016. 92 p. (in Russ.).
2. Panteleenko F.I., Karpets M.N., Belotserkovsky M.A., Sosnovsky A.V. *Opreделение adgezionnoy i kogezionnoy prochnosti metallicheskikh pokrytiy, nanesennykh giperzvukovoy metallizatsiy* [Determination of adhesive and cohesive strength in metal coatings deposited by hypersonic metallization]. *Science & technique*, 2021, vol. 20, no. 6, pp. 459–464. DOI: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-459-464> (in Russ.).
3. Panteleenko F.I., Karpets M.N., Belotserkovsky M.A., Sosnovsky A.V. *Vliyanie rezhimov giperzvukovoy metallizatsii na prochnost stsepleniya metallicheskikh pokrytiy* [Influence of hypersonic metallization modes on the adhesion strength of metal coatings]. *Herald of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied sciences*, 2021, no. 11, pp. 31–36 (in Russ.).
4. Belotserkovsky M.A., Pryadko A.S., Cherepko A.E. *Ustroystvo dlya vysokoskorostnogo napyleniya pokrytiy (varianty)* [Device for high-speed coating spraying (options)]. Patent BY, no. 4365, 2002 (in Russ.).
5. Panteleenko F.I., Belotserkovsky M.A., Karpets M.N., Sosnovsky A.V. *Sravnitelnyy analiz fiziko-mekhanicheskikh svoystv pokrytiy, nanesennykh sposobami elektrodugovoy i giperzvukovoy metallizatsii* [Comparative analysis of physical and mechanical properties of coatings applied using electric arc spraying and hypersonic metallization methods]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2019, no. 4(49), pp. 48–54 (in Russ.).
6. Belotserkovsky M.A., Dyuzhev A.A., Pryadko A.S., Cherepko A.E., Skvortsov V.A., Sosnovsky A.V. *Sposob giperzvukovoy metallizatsii i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Hypersonic metallization method and device for its implementation]. Patent EA, no. 024778, 2016 (in Russ.).
7. State Standard 2246-70. *Provoloka stalnaya svarochhnaya. Tekhnicheskie usloviya* [Welding steel wire. Specifications]. Moscow, Standartov Publ., 1970. 17 p. (in Russ.).
8. *Stal marki 95Kh18* [95X18 (95Kh18) steel grade]. Available at: http://metallischekiy-portal.ru/marki_metallov/stn/95X18 (accessed 20 February 2022) (in Russ.).
9. State Standard 19807-91. *Titan i splavy titanovye deformiruyemye. Marki* [Wrought titanium and titanium alloys. Grades]. Moscow, Standartov Publ., 1991. 9 p. (in Russ.).
10. Tushinskiy L.I., Plokhov A.V., Tokarev A.O., Sindeev V.I. *Metody issledovaniy materialov: struktura, svoystva i protsessy naneseniya neorganicheskikh pokrytiy* [Methods of materials research: structure, properties and processes of inorganic coatings application]. Moscow, Mir Publ., 2004. 384 p. (in Russ.).
11. Panteleenko F.I., Karpets M.N. *Vliyanie nekotorykh faktorov na ossobennosti ispytaniya prochnosti stsepleniya metallicheskikh pokrytiy* [Influence of some factors on the features of testing the adhesion strength of metal coatings]. *Materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Innovatsii v mashinostroenii"* (InMash-2020) [Proc. 11th International scientific and practical conference "Innovations in mechanical engineering" (ISPCIME-2020)]. Biysk, 2020, pp. 283–288 (in Russ.).
12. Paton B.E., et al. *Tekhnologiya elektricheskoy svarki metallov i splavov plavlaniem* [Technology of electric welding of metals and alloys by melting]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 768 p. (in Russ.).