

УДК 621.793

## ОСОБЕННОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДАМИ МЕТАЛЛИЗАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОРОШКОВЫХ ПРОВОЛОК

*д-р техн. наук, доц. М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ;*  
*канд. техн. наук А.В. СОСНОВСКИЙ; Д.И. ТРУСОВ*  
*(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск);*  
*А.П. ЯЛОВИК*  
*(ОАО «Нефтезаводмонтаж», Новополоцк);*  
*канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН*  
*(Полоцкий государственный университет)*

*Рассматривается использование композиционных порошковых проволок в процессах электродуговой металлизации. Показана необходимость учитывать при этом размер износостойкого наполнителя. Установлена зависимость между скоростью струи распыляющих газов и размером частиц наполнителя, благодаря которой обеспечиваются максимальные значения твердости наносимых покрытий. Предложена технология металлизации износостойких композиционных покрытий толщиной более 0,8 мм послойным напылением монокристаллических и композиционных проволок. Установлено, что износостойкость металлизационных покрытий, напыленных композиционными порошковыми проволоками, превышает износостойкость гальванического хромового покрытия.*

**Ключевые слова:** электродуговая металлизация, гиперзвуковая металлизация, порошковые проволоки, твердость и износостойкость покрытий.

**Введение.** Технологии, основанные на нагреве и распылении проволок, хорошо зарекомендовали себя при восстановлении, упрочнении и защите от коррозии и изнашивания деталей общемашиностроительного профиля. Как показала практика, наиболее экономичными и эффективными методами проволоочного газотермического напыления являются традиционная электродуговая металлизация (ЭДМ) и гиперзвуковая металлизация (ГМ) [1; 2]. Последняя отличается высокими динамическими параметрами распыляющего потока (скорость до 1500 м/с), что и обусловило название процесса [2].

Использование композиционных порошковых проволок взамен монокристаллических как электродных материалов для газотермического напыления позволило широко варьировать химический состав покрытий, расширить область их использования, а также во многих случаях получить покрытия со свойствами на уровне лучших плазменных и сверхзвуковых газотермических покрытий, но в 5...10 раз дешевле.

Покрытия из порошковых проволок используют во многих отраслях техники для восстановления и защиты от абразивного и газоабразивного изнашивания при комнатной и повышенных температурах до 700 °С, для ремонта различных деталей машин и агрегатов, работающих в условиях граничного трения [3–8].

Основными производителями композиционных порошковых проволок в мире являются следующие компании: Sulzer Metco (США), Powder Alloy Corporation (США), Praxair Surface Technologies (США), TAFA (США), Boeing (США), Durum (ФРГ), Kanthal (Швеция). Каждая из приведенных компаний производит достаточно широкую гамму композиционных проволок, хотя необходимо отметить, что многие марки близки по составу. Порошковые проволоочные материалы выше по стоимости, чем проволоки из высоколегированных сталей, но обладают более высокой твердостью и эксплуатационными свойствами (табл. 1).

Таблица 1. – Технические характеристики некоторых выпускаемых в Российской Федерации стальных проволоочных материалов

Марка проволоки	Химический состав	Назначение	Твердость покрытия после напыления, HV
Св08	C – 0,08...0,1%	Сварка низкоуглеродистых сталей, ЭДМ	250...300
Св 08Г2С	C – 0,08...0,1%, Mn – 1,5...2,0%, Si – 0,8...1,2%		250...300
Нп 40	C – 0,37...0,42%	ЭДМ, износостойкая наплавка	300...350
Нп 60	C – 0,57...0,62%		350...400
65Г	C – 0,63...0,68%, Mn – 0,8...1,2%,		350...400
ПП-ТП1 (порошковая)	C – 0,67%, Cr – 3,58%, Ni – 2,33%, Si – 0,27%, Mn – 0,42%, Al – 2,08%	ЭДМ и наплавка деталей трибосопрежений	400...450
НП-4 (порошковая)	Система легирования Fe – C – B – Cr		400...450

Преимущества порошковых проволок обуславливаются не только гетерогенной структурой покрытия после напыления, но и активным взаимодействием компонентов порошковой шихты друг с другом при напылении и с подложкой, что способствует повышению температуры частиц, раскислению оксидов на поверхности подложки и, как следствие, повышению адгезии покрытия к подложке.

Выпускаемые композиционные порошковые проволоки представляют собой, как правило, стальную или никелевую оболочку, заполненную порошковой шихтой (рис. 1).

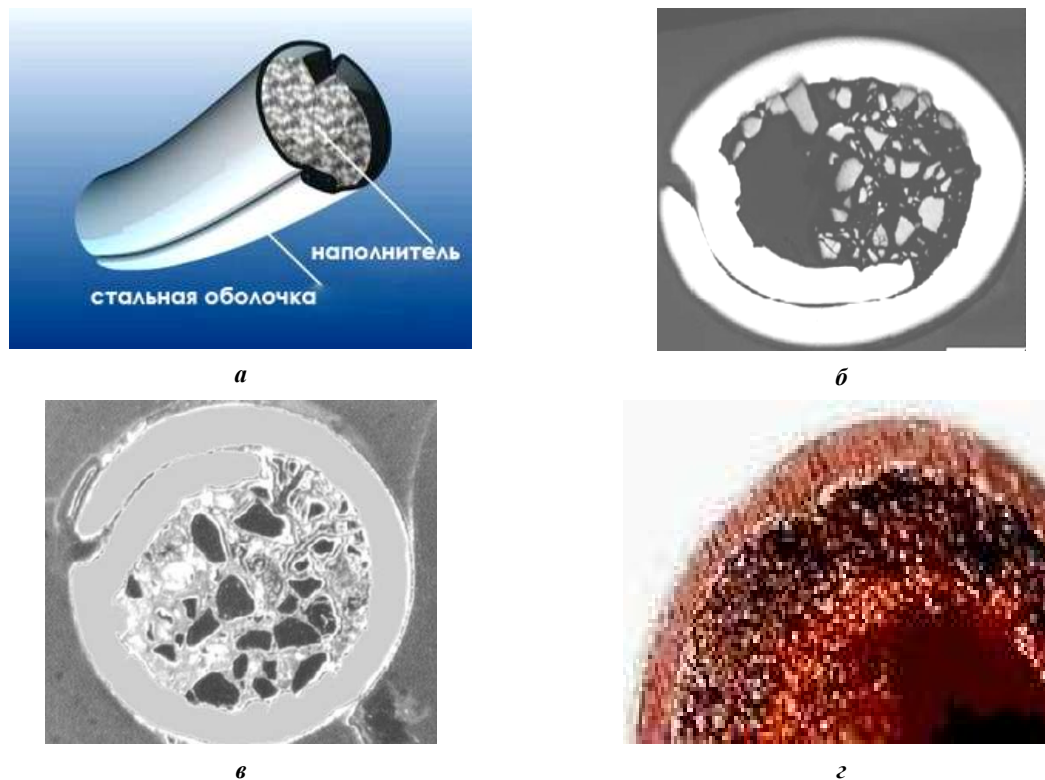


Рисунок 1. – Схема устройства порошковой проволоки (а) и поперечное сечение композиционных проволок, выпускаемых фирмами «Durum» (б), «Sulzer Metco» (в), «Praxair Surface Technologies» (г)

Исследование особенностей процесса восстановления деталей гиперзвуковой и традиционной электродуговой металлизацией при использовании порошковых проволок в качестве распыляемых электродов и явилось целью данной работы.

**Оборудование и методики исследований.** Использовали четыре типа металлизаторов, каждому из которых соответствовали свои значения скорости распыляющей струи. Традиционная электрометаллизация осуществлялась на установке ЭМ-14 при расходах воздуха около  $36..43 \text{ м}^3/\text{ч}$  и давлении  $0,40..0,54 \text{ МПа}$ , что обеспечило скорость распыляющей воздушной струи от 80 до 150 м/с. Увеличение давления воздуха до  $0,65 \text{ МПа}$  и расхода до  $60 \text{ м}^3/\text{ч}$  на металлизаторе модели ЭМ-12 позволило повысить скорость воздушной струи до 320 м/с. Активированная электродуговая металлизация (АДМ) на установке АДМ-6, оснащенной камерой сгорания пропано-воздушной смеси с соплом Лавалья, обеспечила скорость распыляющей струи от 500 до 850 м/с. Гиперзвуковой металлизатор АДМ-10 конструкции ОИМ (Объединенного института машиностроения НАН Беларуси) позволил распылять струей, летящей со скоростью до 1500 м/с.

Для нанесения покрытий использовали порошковые проволоки с характеристиками, приведенными в таблице 2. Покрытия наносили на цилиндрические и плоские образцы из стали 20. Перед восстановлением рабочая поверхность образцов и пластин подготавливалась струйно-абразивным методом.

Микроструктуру исследовали с помощью оптического микроскопа Axiovent 200 MAT и сканирующего электронного микроскопа JSM-840.

Фазовый состав покрытий определяли на дифрактометре ДРОН-3.0 (монохроматизированное  $\text{CoK}_{\alpha}$  излучение,  $V = 30 \text{ кВ}$ ,  $I = 10 \text{ mA}$ ), твердость – по методу Виккерса на твердомере ТП, микротвердость измерялась на микротвердомере НХ 1000ТМ при нагрузках  $0,2..1,0 \text{ Н}$ .

Ускоренные триботехнические испытания образцов с покрытиями осуществлялись на машине трения МТВП-9М по схеме возвратно-поступательного перемещения.

Таблица 2. – Характеристики используемых проволок

Марка проволоки	Диаметр проволоки, мм	Наполнители	Размер частиц наполнителей, мкм
ПП-Нп-ПСТ 350Т ЗАО «Спецсплав», Украина	1,6...1,8	WC, Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> , TiC	120...350
DURMAT AS-815 «DURUM», Германия	1,62	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> , B <sub>4</sub> C, SiC	40...100
ПП-ПМ-6 ООО «Северстальметиз», Россия	1,8	WC, B <sub>4</sub> C	100...250
ПП-Нп-19ГСТ ООО «Северстальметиз», Россия	1,6...1,8	WC, карбоборид хрома	80...160
DURMAT AS-897 «DURUM», Германия	1,62	WC, SiC, TiC	40...60
Sulzer Metco 8297 «Sulzer Metco Inc.», США	1,62	WC, SiC, TiC	45...60
ПП-ОИМ-ГМ ЗАО «Спецсплав», Украина по заказу ОИМ	1,8	SiC, Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	5...20

**Результаты исследований и их обсуждение.** Анализ полученных результатов показывает, что если для наплавки размер наполнителя практически не оказывает влияния на его содержание в конечном продукте – покрытии, то при электрометаллизации этот параметр играет важную роль. Чем больше скорость перемещения частиц наполнителя из зоны дуги и скорость их движения в струе, тем меньше степень их прогрева и тем больше вероятность отскока от упрочняемой поверхности детали, что снижает коэффициент использования материала, а соответственно и интегральную твердость, и износостойкость покрытий. Коэффициент использования материала наполнителя – это отношение количества наполнителя в покрытии к количеству наполнителя в проволоке, характеризует степень перехода наполнителя из напыляемого материала в покрытие. Это подтверждается и измерениями твердости покрытий, в результате которых установлено, что покрытия, сформированные распылением проволок ПП-Нп-ПСТ 350Т (материал предназначен для наплавки) всеми использованными установками, не обеспечивают твердости, гарантированной изготовителями. Как правило, твердость покрытий не превышала 32 HRC.

Изучение шлифов поперечных сечений проволок показало, что размеры частиц твердых включений в шихте составляют более 250 мкм, а толщина оболочки – около 350 мкм.

Исследования, проведенные с проволоками, имеющими наполнитель различных размеров, подтвердили предположение, что при высокой скорости эвакуации из зоны дуги столь крупные частицы не успевают прогреться и не участвуют в процессе формирования покрытия, образуя практически только из материала оболочки (рис. 2).

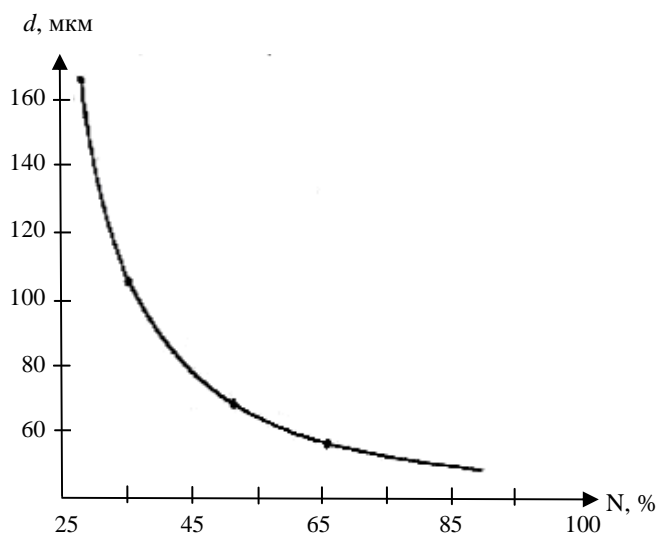


Рисунок 2. – Связь между количеством порошкового наполнителя, попадающего в напыляемое покрытие и средним размером его частиц

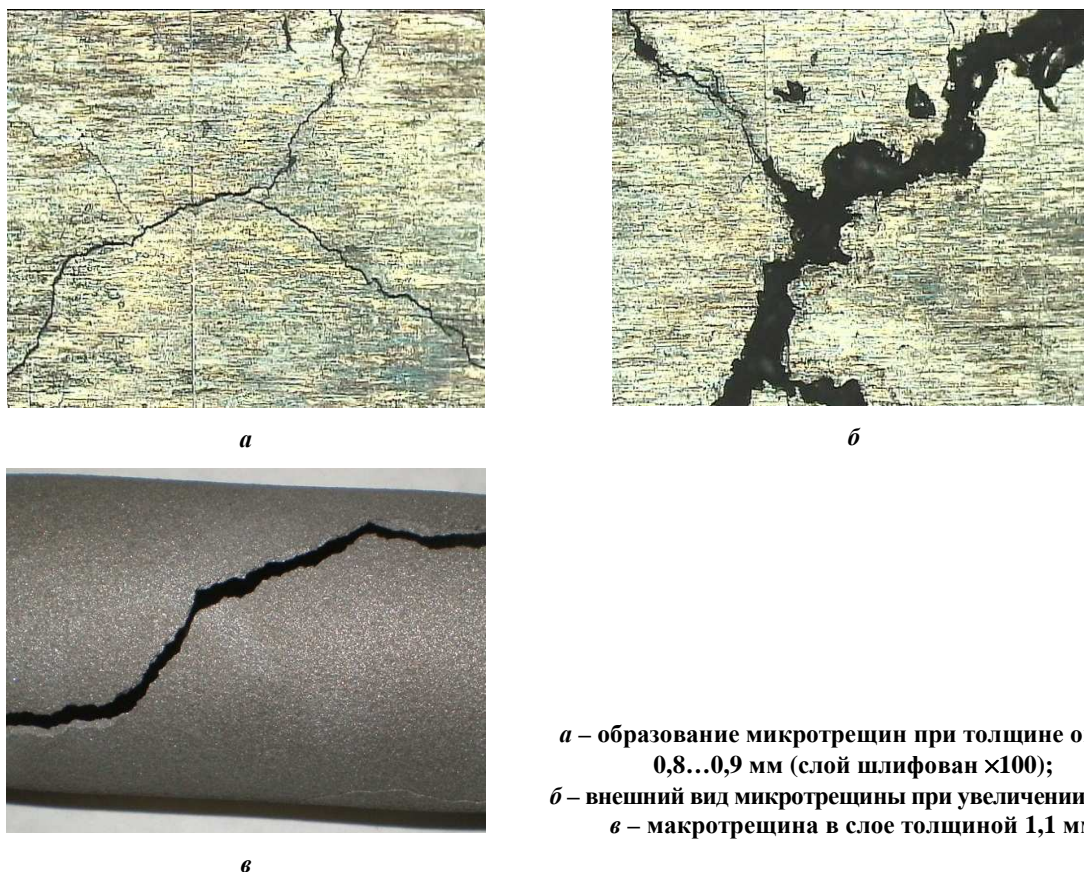
Для того чтобы обеспечить достаточно высокое содержание наполнителя в покрытии, необходимо выбирать скорость движения распыляющей струи в зависимости от максимального размера частиц наполнителя в порошковой проволоке. Установлено определенное соотношение между этими параметрами, которое можно представить в виде следующего выражения:

$$V \leq A \cdot e^{-0,02d},$$

где  $V$  – скорость газовой струи (м/с);  $A$  – коэффициент, численно равный 1470 (м/с);  $e$  – основание натурального логарифма;  $d$  – величина, численно равная максимальному диаметру в микронах частиц износостойкого наполнителя.

Анализ полученных данных свидетельствует, что порошковый наполнитель в композиционной проволоке, распыляемой гиперзвуковой металлизацией, должен иметь размеры не более 50 мкм.

Дальнейшие экспериментальные исследования показали, что материалы с большим количеством износостойкого наполнителя, в частности Sulzer Metco 8297, весьма чувствительны к толщине наносимого покрытия. Так, практически не удавалось получить из материала Sulzer Metco 8297, а затем и из DURMAT AS-897 покрытия толщиной более 1,1 мм. После напыления слоя толщиной около 0,9 мм на нем появлялись микротрещины; после напыления слоя 1 мм они увеличивались в размерах, а при достижении толщины 1,1 мм покрытие лопалось (рис. 3). Заметим, что материал DURMAT AS-815 позволяет получать покрытия большей толщины (до 2 мм), однако для этого необходимо уменьшать толщину формируемого за один проход слоя, увеличивать количество проходов и непрерывно контролировать теплонагруженность образца.

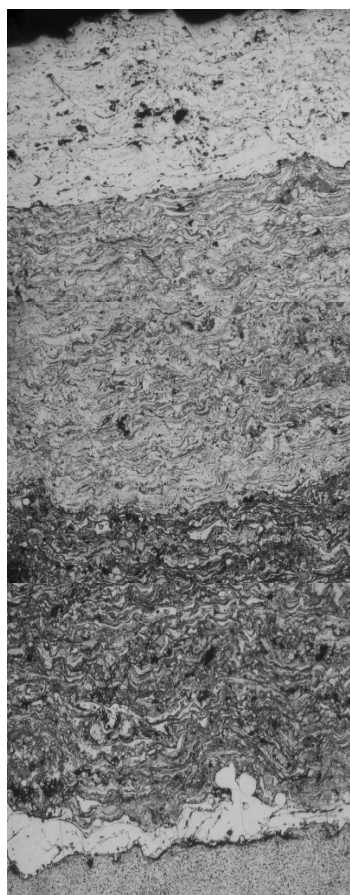


**а** – образование микротрещин при толщине около 0,8...0,9 мм (слой шлифован  $\times 100$ );  
**б** – внешний вид микротрещины при увеличении  $\times 200$ ;  
**в** – макротрещина в слое толщиной 1,1 мм

**Рисунок 3. – Рост трещины в покрытии, полученном напылением материалов Sulzer Metco 8297 и DURMAT AS-897**

Для восстановления-упрочнения деталей с износом рабочих поверхностей более 0,5 мм предложена следующая технология. На подготовленную поверхность детали наносится подслой распылением проволоки из нихрома типа X20H80, обеспечивающий достаточную прочность сцепления покрытия с основой. Толщина подслоя, как правило, не превышает 150 мкм. На поверхность подслоя наносят слой 0,20...0,35 мм распылением проволоки из стали мартенситного класса, позволяющей создать в слое закалочные структуры. Затем наносят слой напылением композиционной порошковой проволоки, обеспечи-

вающей требуемую износостойкость и коррозионную стойкость покрытия (рис. 4). Такая комбинация слоев помимо экономической выгоды (снижается общая стоимость покрытия) обуславливает возможность эксплуатации покрытия в условиях абразивного изнашивания при ударных нагрузках.



Слой Sulzer Metco 8297

Слой из стали 40X13

Слой из порошковой проволоки  
30X20NM

Подслой из X20H80

Основа

**Рисунок 4. – Микроструктура многослойного покрытия**

Анализ микроструктуры свидетельствует о следующем:

- в верхнем слое из Sulzer Metco 8297 трещины отсутствуют;
- плотность напыленных слоев из стали 40X13 и из порошковой проволоки 30X20NM близка к плотности компактного материала;

- в слое Sulzer Metco 8297 присутствуют включения и поры, которые визуально трудно различить. Как правило, в газотермических покрытиях редко встречаются поры сферической формы, поскольку они образуются на границах деформированных при ударе частиц и имеют вытянутую форму.

Результаты проведенных исследований микротвердости напыленных слоев из материала AS-897 и Sulzer Metco 8297, представленные на рисунках 5а, б, показали:

- первый слой толщиной 100...120 мкм из AS-897, напыленный на подслое из X20H80, имеет наибольшую микротвердость, которая составляет 7000...8000 МПа. В переводе в единицы HRC (Роквелл, шкала С) это составляет 59...62 HRC;

- последующие слои имеют твердость значительно ниже, что можно объяснить только влиянием температуры образца, накапливающейся с каждым последующим слоем.

Таким образом, можно сделать вывод о необходимости дискретного выполнения операции напыления и интенсивного охлаждения детали после напыления каждого слоя толщиной не более 120 мкм.

Результаты первых экспериментов по механической обработке покрытий показали, что для шлифования покрытий из высокотвердых материалов Durum и Sulzer Metco необходимо выбирать конкретные для каждого них специфические режимы и типы шлифовальных кругов. После использования абразивных кругов из электрокорунда для шлифования литых сталей на поверхности покрытия появились мелкие впадины, похожие на поры (рис. 6, б). Особенно это характерно для материала DURMAT AS-897. После более тщательного анализа дефектов установлено, что впадины не являются порами, а представляют собой

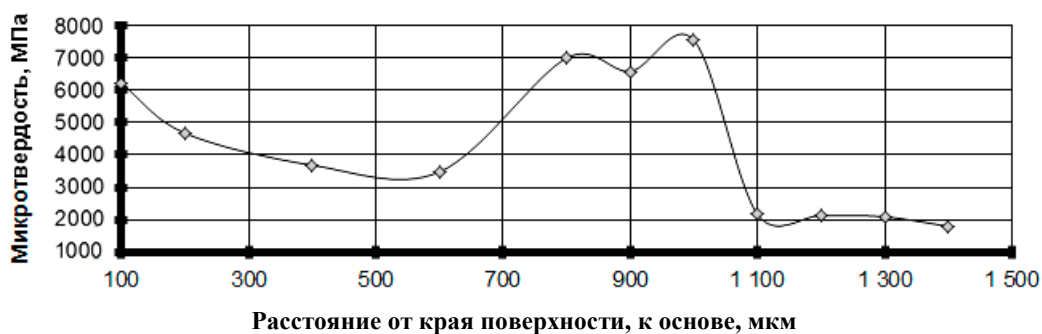


пустоты, оставленные выкрашивающимися при шлифовании частицами карбидов, входящими в состав распыляемого материала.

В связи с отсутствием необходимых шлифовальных кругов дальнейшая обработка производилась вручную с помощью шлифовальных шкурок. Ручная обработка позволила получить поверхность без подобных дефектов. Для заполнения мелких впадин можно также рекомендовать метод деформационного плакирования, который хорошо зарекомендовал себя при обработке покрытий с поверхностными порами диаметром до 100 мкм [9].



а



б

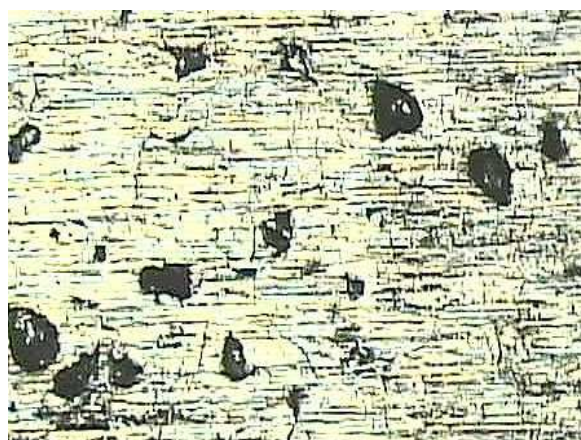
а – покрытие, включающее подслой X20H80 ( $\approx 200$  мкм),  
 слой DURMAT AS-897 ( $\approx 600$  мкм), слой смеси AS-897 + 40X13 ( $\approx 900$  мкм);

б – покрытие, включающее подслой X20H80 ( $\approx 200$  мкм) и последующий слой DURMAT AS-897

Рисунок 5. – Распределение микротвердости по толщине покрытий из материала DURMAT AS-897



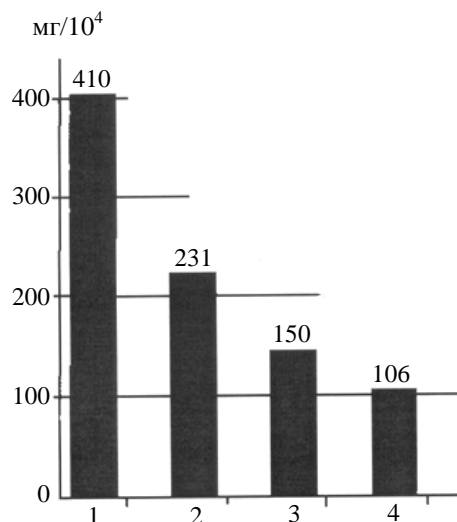
а



б

Рисунок 6. – Внешний вид напыленного покрытия (а)  
 и поверхность после шлифования (б)  $\times 200$

Ускоренные триботехнические испытания образцов с покрытиями в режиме трения скольжения в 12%-ном растворе соляной кислоты, содержащем частицы двуоксида кремния, показали (рис. 7), что износостойкость гальванического хромового покрытия уступает напыленным покрытиям из материалов DURMAT AS-815 и Sulzer Metco 8297.



1 – ГМ-покрытие из стали 40X13;  
2 – гальваническое хромовое покрытие;  
3 – ГМ-покрытие AS-815; 4 – покрытие Sulzer Metco 8297

Рисунок 7. – Интенсивность изнашивания (мг за 10<sup>4</sup> циклов) покрытий

Изучение микрошлифа с разрушенным гальваническим покрытием показало, что под покрытием твердого хрома развивается пластическая деформация на глубине 100...150 мкм, которая и вызывает его разрушение.

В работах [10; 11] Института физики прочности и материаловедения СО РАН, отмечалось, что при больших удельных нагрузках гальванические хромовые покрытия, нанесенные на детали узлов трения скольжения, изнашиваются и разрушаются интенсивно. Например, при исследовании отработанных штоков виброгасителей железнодорожных вагонов, при изготовлении которых на полированную стальную поверхность электролитическим методом наносили хромовое покрытие толщиной около 25...40 мкм, покрытия изнашивались до истечения гарантийного срока службы детали.

Предположительно, причиной этого является разрушение покрытия вследствие пластической деформации подложки, которая значительно выше, чем деформация покрытия.

Таким образом, на основании результатов проведенного исследования можно сделать следующие **выводы**:

1) установлено, что порошковые проволоки (произведенные в России и Украине), предназначенные для процессов электродуговой наплавки, при распылении методами традиционной электродуговой металлизации и гиперзвуковой металлизации не обеспечивают твердость в напыленных покрытиях более чем 32 HRC. Это явление обусловлено быстрой эвакуацией крупных частиц наполнителя из зоны дуги;

2) установлена зависимость количества частиц порошкового наполнителя композиционных проволок, попадающих в покрытие при металлизации, от их размера. Для обеспечения высокого содержания наполнителя в покрытии необходимо выбирать скорость движения распыляющей струи в зависимости от максимального размера частиц наполнителя в порошковой проволоке. Показано, что при гиперзвуковой металлизации необходимо использовать порошковые проволоки с размерами частиц наполнителя менее 50 мкм;

3) при гиперзвуковой металлизации композиционных проволок, содержащих большое количество неметаллических наполнителей (карбидов, карборидов), необходимо за один проход наносить слои толщиной не более 100...120 мкм и охлаждать их после каждого прохода до комнатной температуры. Для формирования покрытий толщиной более 0,8 мм необходимо наносить многослойное по-

крытие, у которого нижележащие слои наносятся стальными проволоками, а верхний слой, полученный распылением композиционной проволоки, должен иметь толщину не более 0,5 мм;

4) износостойкость покрытий, напыленных материалами Sulzer Metco 8297, DURMAT AS-815 и DURMAT AS-897, превышает износостойкость гальванического хромового покрытия в 1,5...2,1 раза.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Белоцерковский, М.А. Активированное газопламенное и электродуговое напыление покрытий проволочными материалами / М.А. Белоцерковский, А.С. Прядко // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. – № 12. – С. 17–23.
2. Оценка возможности использования гиперзвуковой металлизации при восстановлении элементов гидросистем / М.А. Белоцерковский [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2015. – № 11. – С. 36–42.
3. Tribological properties of arc sprayed coatings obtained from FeCrB and FeCr based powder wires / A. Pokhmurskaya [et al.] // Surface & Coating Technology. – 2002. – 151–152. – P. 490–194.
4. Triboelektroche miczne wtasciwosci powlok natryskiwanych lukowo na stopy aluminium / V. Pokhmurskii [et al.] // Inzynieria Powierzchni. – 2008. – № 1. – S. 9–13.
5. Високотемпературна корозія електродугових покриттів з порошкових дротів на базі системи Fe–Cr–B–Al / М. Студент [та інш.] // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2008. – № 5. – С. 93–97.
6. Похмурский, В.И. Порошковые проволоки серии ФМИ для электродугового напыления покрытий (Обзор) / В.И. Похмурский, М.М. Студент, В.М. Гвоздецкий // Автоматическая сварка. – 2011. – № 9. – С. 18–21.
7. Исследование структуры и свойств газотермических покрытий из порошковых проволок / Г.Г. Винокуров [и др.] // Вестн. ЯГУ. – 2005. – Т. 2, № 3. – С. 57–60.
8. Винокуров, Г.Г. Разработка и применение порошковых проволок для газопламенного напыления / Г.Г. Винокуров, Н.Ф. Стручков // Современные наукоемкие технологии. – 2004. – № 6. – С. 36–37.
9. Белоцерковский, М.А. Модифицирование поверхности газотермических покрытий из коррозионно-стойких сталей деформационным плакированием / М.А. Белоцерковский, М.А. Леванцевич, Е.Ф. Коновалова // Механика машин, механизмов и материалов. – 2016. – № 1. – С. 64–67.
10. Панин, В.Е. Основы физической мезомеханики / В.Е. Панин // Физическая мезомеханика. – 1998. – Т. 1, № 1. – С. 5–22.
11. Клименов, В.А. Исследование характеристик деформации на мезомасштабном уровне и разрушения композитов «газотермическое покрытие» – основа при растяжении / В.А. Клименов, С.В. Панин, В.П. Безбородов // Физическая мезомеханика. – 1999. – Т. 2, № 1–2. – С. 141–156.

Поступила 24.01.2017

#### PECULIARITIES OF RESTORING DETAILS BY METHODS OF METALIZATION USING COMPOSITE POWDER WIRE

**M. BELOTSEKOVSKY, A. SOSNOVSKY, D. TRUSOV,  
A. YALOVIK, A. DUDAN**

*The use of composite powder wires in the processes of electric arc metallization is considered. It is shown that it is necessary to take into account the size of the wear-resistant filler. A relationship between the velocity of the jet of atomizing gases and the size of the filler particles is established, due to which the maximum hardness values of the applied coatings are provided. The technology of metallization of wear-resistant composite coatings with a thickness of more than 0.8 mm by layer-by-layer deposition of monolithic and composite wires is proposed. It is established that the wear resistance of metallization coatings sprayed with composite powder wires exceeds the wear resistance of the galvanic chrome coating.*

**Keywords:** electric arc metallization, hypersonic metallization, powder wires, hardness and wear resistance of coatings.