

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И СТРУКТУРЫ НАПЫЛЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ПОСЛЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

*Представлены результаты экспериментальных исследований влияния эффективности механической обработки щеточным инструментом на свойства восстановительных газопламенных покрытий. Показано, что применение технологии газопламенного напыления интегрированного со щеточной обработкой обеспечивает возможность повышения качества покрытий, напыленных по традиционной технологии.*

**Ключевые слова:** интегрированная технология, газопламенное покрытие, механическая обработка, щеточный инструмент, пористость, микроструктура, микротвердость.

**Введение.** Одним из перспективных способов восстановления и упрочнения деталей машин является нанесение газотермических покрытий, и, в первую очередь покрытий, нанесенных газопламенным способом, к преимуществам которого следует отнести простоту и дешевизну применяемого оборудования. Специалисты фирмы «Metco» считают газопламенное напыление перспективным методом упрочнения и восстановления деталей, который позволяет продлить срок их службы в 2...20 раз (в зависимости от назначения детали) [1].

Однако качественные параметры газопламенных покрытий не всегда отвечают повышенным требованиям, предъявляемым к эксплуатационным характеристикам деталей машин, работающих в условиях интенсивных нагрузок. Широкому применению газопламенного напыления покрытий препятствует низкая адгезионно-когезионная прочность напыленных покрытий и их высокая пористость.

Исследования газопламенного напыления направлены на рациональное активирование процесса нанесения покрытий путем интегрирования его с другими технологиями. Интегрирование нескольких операций в одну комплексную, выполняемую на специальной установке или машине, нередко позволяют устранить недостатки, присущие традиционным технологиям нанесения восстановительных покрытий. Совмещение производственных операций может осуществляться одновременно во времени и пространстве. На основании выше сказанного поставлена задача разработки способа нанесения покрытий, позволяющего при минимальных дополнительных затратах обеспечить повышение прочности сцепления напыленных покрытий и снижение его пористости. Проведенный анализ методов повышения качества напыленных покрытий позволяет определить следующие тенденции разработки интегрированного способа газопламенного напыления:

- снижение себестоимости при высоком качестве нанесенных покрытий;
- совмещение с технологиями, не вносящими существенных изменений в процесс напыления.

Таким видом упрочнения может стать способ формирования износостойкой поверхности детали, в основе которого принято совмещение газопламенного напыления с механической обработкой металлической вращающейся щеткой. Предлагается в процессе газопламенного порошкового напыления производить механическую обработку специальной металлической щеткой формирующихся слоев покрытия для удаления частиц с низкой когезионной прочностью, окислов и пылевидных частиц. Щеточная обработка как один из наиболее технологичных способов механического воздействия [2] применяется также для подготовки поверхности детали перед напылением для очистки от загрязнений и создания

необходимой шероховатости, активации поверхности основы [3]. Такая интегрированная технология позволяет повысить адгезионную и когезионную прочность покрытия, благодаря послойной релаксации напряжений за счет микропластической деформации наносимых слоев [4], а также активации поверхности основы непосредственно перед напылением. Данное предположение согласуется с литературными данными — взаимодействие материалов в твердой фазе активируется не только температурой, но и давлением [3, 4, 5]. При этом для существенного ускорения взаимодействия материалов при высоких температурах требуется весьма низкие давления, инициирующие направленное движение структурных дефектов [5].

**Целью исследований** является изучение возможности применения механической обработки щеточным инструментом поверхности детали под нанесение газопламенного покрытия и газопламенного покрытия в процессе формирования для повышения его качества.

**Основной материал.** Задача упрочнения деталей с помощью интегрирования двух прогрессивных технологических процессов весьма сложна вследствие различия их характера. Поэтому, даже частичное решение этой задачи на основе анализа и исследования основных закономерностей формирования свойств напыленных поверхностей, позволит эффективно управлять качеством упрочненных деталей.

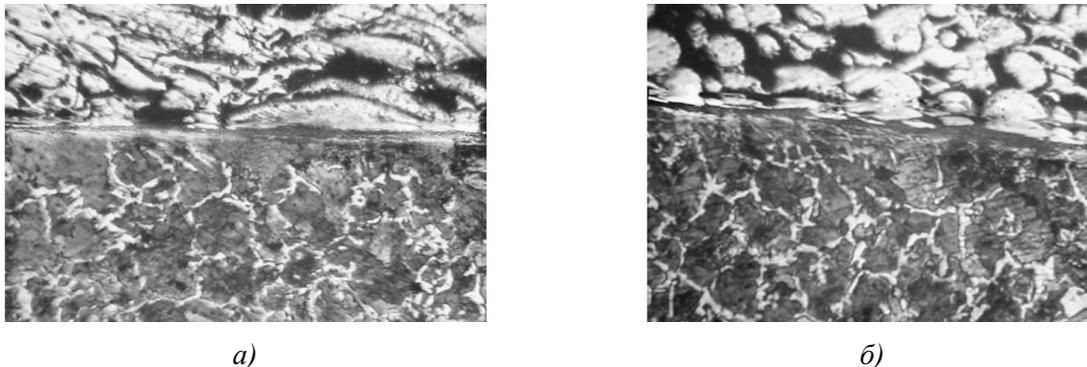
На основании серии предварительно проведенных экспериментов, определены оптимальные значения параметров щеточной обработки (скорость вращения щетки 2100 об/мин; диаметр 0,8 мм и длина игл 40 мм при плотности расположения игл — 32 шт/см<sup>2</sup>), обеспечившие увеличение прочности сцепления покрытия с основой с 18...20 МПа при традиционном способе напыления до 26,5...28 МПа — при интегрированном напылении, причем с незначительными изменениями технологии нанесения покрытия. Установлено, что применение щеточной обработки при газопламенном напылении позволяет в среднем на 22 % увеличить прочность сцепления [6].

В процессе газопламенного напыления покрытие образуется из отдельных расплавленных или близких к этому состоянию частиц, которые с высокой скоростью (40...50 м·с<sup>-1</sup>) соударяются и наслаиваются на поверхность основы (причем в процессе напыления температура основы повысилась от комнатной — 20 °С до 150 °С). Покрытие представляет собой слоистую структуру образованную деформированными плоскими частицами. При движении напыляемых частиц в высокотемпературной газовой струе их поверхность окисляется. В результате каждая частица покрывается пленкой окислов, которая остается на границах частиц в покрытии и препятствует их сплавлению. При первом соприкосновении частиц напыляемого материала с основой в поверхностном слое возникает резкий градиент температур, обуславливающий большую скорость кристаллизации ( $C_k$ ) формирующегося покрытия и явление переохлаждения, ведущее к образованию большого количества центров кристаллизации.

На рис. 1, а в структуре покрытия из ПГ-10Н-0, напыленного газопламенным способом по традиционной технологии, видны многочисленные пустоты (поры), особенно на границе покрытия с основой и недеформированные частицы напыленного материала. Количественный микроанализ показал, что поры имеют округлую форму размером от 10 до 40 мкм, остаточная пористость покрытия составляет 16...18 %. Сцепление покрытия с основным металлом недостаточное, что обусловлено достаточно высокой пористостью слоя вблизи основы. При анализе покрытия, нанесенного с применением щеточной обработки на различных режимах, микроструктура основы металла не изменяется. Поверхность раздела «покрытие – металлическая основа» характеризуется отсутствием скопления пор (рис. 1, б).

Щеточная обработка, согласно данным исследований, очищает поверхность от загрязнений и создает развернутый микропрофиль с требуемой шероховатостью, разрушает окисную пленку, образующуюся на поверхности основного металла. Появившиеся при этом мелкие частицы окислов играют роль дополнительных центров кристаллизации, в результате чего формирующийся переходной слой имеет мелкозернистое полиэдрическое

строение, что обусловлено сверхбыстрой кристаллизацией, которая приводит к образованию большого количества краевых дефектов у зерен — вакансий и дислокаций. Полученная шероховатость поверхности  $Ra\ 10\dots 12\ \mu\text{м}$  при применении щеточной обработки обеспечивает увеличение площади контакта основы с напыляемым покрытием и, как следствие, повышение адгезии поверхности основы и покрытия за счет роста механического взаимодействия.



**Рис. 1. Структура напыленных покрытий из сплава ПГ-10Н-01 на стали 45 ( $\times 130$ ) без щеточной обработки (а) и со щеточной обработкой (б) при подготовке поверхности ( $n_1 = 150$  об/мин) и в процессе напыления ( $n_2 = 2100$  об/мин) при  $N = 3$  мм,  $d_{\text{ш}} = 0,8$  мм,  $l_{\text{ш}} = 40$  мм**

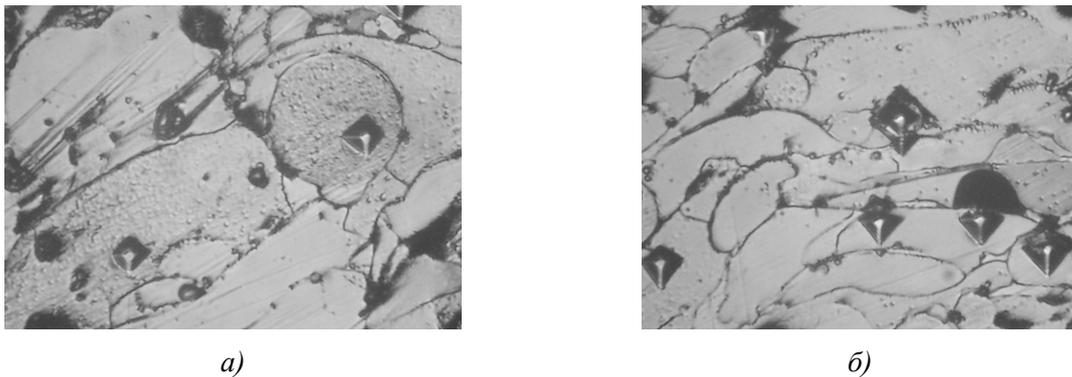
Определение твердости переходного слоя  $H = 50\text{--}330\text{--}367$  показало, что она выше, чем у никеля —  $H = 50\text{--}200\text{--}224$ , и может быть объяснено образованием большого количества дислокаций при бурно протекающем процессе кристаллизации, т. е. возникновением напряжений II рода. Причем при увеличении оборотов вращения щетки количество центров кристаллизации ( $\text{Ч}_{\text{ц}}$ ) возрастает.

Образцы, напыленные по интегрированной технологии (рис. 1, б), отличаются более мелкозернистым строением. Структура таких покрытий представлена более протяженными ламелями и более упорядочена. Условия кристаллизации последующих слоев покрытия значительно отличаются от условий кристаллизации переходного слоя: практически отсутствует переохладение, уменьшается температурный градиент.

Поэтому следовало ожидать образование крупнозернистой структуры в покрытии за счет уменьшения скорости кристаллизации. Применение же щеточной обработки в процессе формирования напыляемых слоев покрытия обеспечивает увеличение количества центров кристаллизации за счет разрушения окисных пленок на границах частиц в слоях покрытия и нарушающих целостность структуры покрытия, поэтому зерна в покрытии получаются более мелкие. Металлографические исследования показали, как и предполагалось, в результате микропластического воздействия щеточной обработки, плотность напыленных покрытий заметно повысилась, остаточная пористость составила  $8\dots 10\%$ , причем поры принимают вытянутую форму и уменьшаются до размера  $5\dots 15\ \mu\text{м}$ , т. е. можно сказать происходит так называемое «залечивание» пор.

В целом микроструктура напыленного покрытия представляет собой гетерогенную многофазную систему, основу которой составляют вытянутые зерна никеля и зерна твердого раствора на основе никеля, имеющие вид более темных однородных участков (рис. 2 а, б). В структуре выявлены твердые составляющие, такие как тонкодисперсные карбидные и карбоборидные эвтектики, имеющие вид более светлых гладких участков микротвердостью  $6800\dots 8510$  МПа, а микротвердость эвтектики розеточного типа составляет до  $5000\dots 5570$  МПа. В металлической основе достаточно равномерно распределены мелкие карбиды хрома и бора (серые круглые — рис. 2, а, по морфологии идентифицированы как  $\text{Me}_3(\text{CB})$ ), а также мелкие частицы оксидов, что подтверждено микрорентгено-

спектральным анализом, замером микротвердости отдельных фаз в покрытии — 11 000...13 500 МПа, и согласуется с литературными данными.



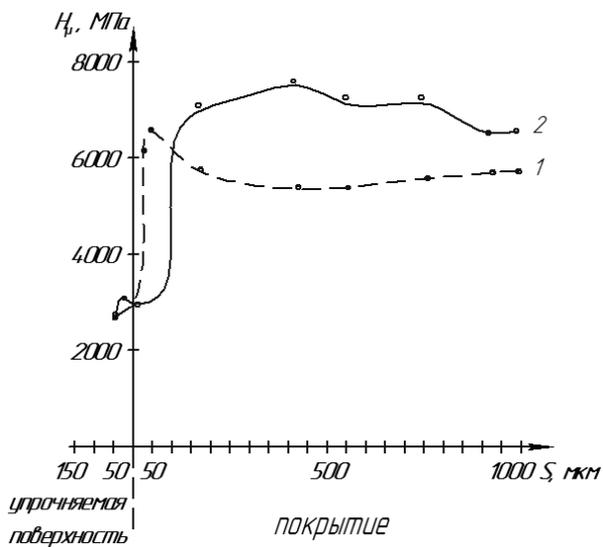
**Рис. 2. Микроструктура покрытия, нанесенных газопламенным напылением, совмещенным со щеточной обработкой (×260)**

Таким образом, микроструктура напыленного слоя представляет собой достаточно мягкую с повышенной вязкостью матрицу, в которую вкраплены твердые и износостойкие карбиды, обеспечивающие повышенную прочность и износостойкость напыленного покрытия в условиях граничного трения и трения в условиях смазки. Разрушение окисных пленок на отдельных частицах, в процессе формирования покрытия металлической щеткой обеспечивает сплавление металлических частиц и их соединение под действием сил Ван-дер-Ваальса.

Твердость покрытия оценивали микротвердостью на шлифах. Проводили послойное измерение микротвердости на ПМТ-3 при нагрузке 100 г. В результате анализа данных эксперимента (рис. 3) наблюдается рост микротвердости (на 10...15 %) при применении щеточной обработки, более равномерное распределение её по толщине покрытия, колебания значений по толщине не превышает 10 %. Эксплуатационные свойства восстановленных деталей определяются характером изменения твердости в ЗТВ и по глубине детали. Наблюдается скачок в твердости покрытий, напыленных по традиционной технологии (рис. 3, кривая 1), что может привести к появлению усталостных трещин и дефектов, снижающих в целом прочность детали. Высокая твердость ЗТВ обусловлена охлаждением и частичным диффузионным проникновением легирующих элементов (Cr и Ni) в поверхность детали. Действие механического фактора щеточной обработки (рис. 3, кривая 2) обеспечивает более плавное снижение микротвердости от покрытия к основному металлу. Твердость покрытия обеспечивается наличием твердых фаз — карбидов хрома, боридов никеля. Наблюдаемое повышение твердости поверхностного слоя обеспечивается за счет уплотнения слоев и уменьшения количества пор при послойной обработке щеткой слоев покрытия.

Несущую способность покрытия определяли методом вдавливания алмазной пирамиды твердомера ПМТ-3 с углом при вершине 136° при заданной нагрузке. Считалось, что слой покрытия имеет достаточную несущую способность, если после снятия нагрузки с индикатора на краях четырехугольной лунки не обнаруживалось трещин, характерных для разрушенного покрытия. Замер критической толщины напыленного слоя на исследуемых образцах показал, что она находится в пределах 28...36 мкм, позволяющая исключить возможность продавливания абразивом поверхностного слоя деталей при трении.

**Выводы.** Металлографические исследования показали, что структурные особенности напыленных газопламенных покрытий, вызваны влиянием микропластической деформации как результата механической обработки специальной металлической щеткой.



**Рис. 3. Распределение микротвердости по толщине напыленного покрытия:**

1 – по традиционной технологии; 2 – по интегрированной технологии; (согласно стандарта ISO 14577)

В результате механического воздействия «ламель» имеют более протяженный характер, количество пор в покрытии снижено с 18 до 10 %.

В результате проведенных исследований выдвинуто предположение, что увеличение твердости напыленного поверхностного слоя (на 18...20 %), снижение микротвердости подповерхностных слоев и увеличение твердости в более глубоких слоях в процессе интегрированного газопламенного напыления происходит за счет образования большого количества дислокаций при бурно протекающем процессе кристаллизации. Появившиеся при разрушении окисных пленок в покрытии мелкие частицы окислов играют роль дополнительных центров кристаллизации.

#### Литература

1. Харламов, Ю.А. Газотермическое напыление покрытий и экологичность производства, эксплуатации и ремонта машин [Текст] / Ю.А. Харламов // Тяжелое машиностроение. – 2000. – № 2. – С. 3–10.
2. Кершенбаум, В.Я. Механотермическое формирование поверхностей трения [Текст] / В.Я. Кершенбаум. – М.: Машиностроение, 1987. – 232 с.
3. Лузан, С.А. Совершенствование метода газопламенного нанесения покрытий [Текст] / С.А. Лузан // VII Международная конференции «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов»: сб. докладов. – Х.: ННЦ «ХФТИ», ИПЦ «Контраст», 2006. – С. 182–183.
4. Русев, Г.М. Технология восстановления и упрочнения наружных и внутренних поверхностей плазменным напылением [Текст] / Г.М. Русев, В.В. Овсянников, С.М. Киселев, Н.Ф. Галюк // Автоматическая сварка. – 2000. – № 12. – С. 61–62.
5. Барвинок, В.А. Управление напряженным состоянием и свойствами плазменных покрытий [Текст] / В.А. Барвинок. – М.: Машиностроение, 1990. – 272 с.
6. Дерябкина, Е.С. Распределение случайной величины прочности сцепления двух технологий газопламенного напыления [Текст] / Е.С. Дерябкина // Машинобудування. – Харків: УПА. – 2011. – № 7. – С. 126–136.

© Е.С. Дерябкина

**Є.С. Дерябкіна, к.т.н., доц.**

Українська інженерно-педагогічна академія, м. Харків

### ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ І СТРУКТУРИ НАПИЛЕНИХ ПОКРИТТІВ ПІСЛЯ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ

Представлені результати експериментальних досліджень впливу ефективності механічної обробки щітковим інструментом на властивості відновлювальних газополумєневих покриттів. Показано, що використання технології газополумєневого напылення інтегрованою з щітковою обробкою забезпечує можливість підвищення якості покриттів, які напылені по традиційній технології.

**Ключові слова:** інтегрована технологія, газополумєневе покриття, механічна обробка, щітковий інструмент, пористість, мікроструктура, мікротвердість.

**Ye.S. Deryabkina, Ph.D., Associate Professor**

Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, Kharkov

### **FEATURES OF THE FORMATION AND STRUCTURE SPRAYED COATING AFTER MACHINING**

*The results of experimental studies of the influence of machining efficiency of the brush tool on the properties of reconstruction of gas-flame coatings. It is shown that the use of flame-spraying technology integrated with brush processing provides the possibility of increasing the quality of coatings deposited by conventional techniques.*

**Keywords:** *integrated technology, gas-flame coating, machining, tool brush, porosity, microstructure, microhardness.*

УДК 621.822

**І.Я. Новосад, к.т.н., доц.**

Тернопільський національний економічний університет

### **ВПЛИВ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ НА ЯКІСТЬ ОБРОБЛЕННЯ ГВИНТОВИХ СЕКЦІЙ ГНУЧКИХ КОНВЕЄРІВ**

*Встановлено закономірності зміни складової сили різання  $P_y$  та шорсткість обробленої поверхні залежно від частоти обертання заготовки, подачі та глибини різання в процесі оброблення секцій РО ГГК із Ст 3 і сталі 08кп.*

**Ключові слова:** *гнучкий гвинтовий конвеєр, робочий орган, проточування, секція, технологія.*

**Вступ.** Машинобудування має першочергове значення для технічного переозброєння всього народного господарства країни. Тому сучасний стан його розвитку вимагає пошуку нових шляхів покращення експлуатаційних та технологічних параметрів деталей машин, які б дали змогу покращити якість продукції, зменшити собівартість її виготовлення та ремонту. У машинобудуванні важливе місце посідає задача розроблення прогресивних технологічних процесів (ТП) виготовлення транспортних засобів, прогресивного технологічного оснащення, різального та вимірювального інструментів і відпрацювання на технологічність конструкцій гнучких гвинтових конвеєрів (ГГК) і особливо їх робочих органів (РО) і гнучких рукавів. Незважаючи на значну кількість наукових праць, які присвячені технології виготовлення гнучких гвинтових конвеєрів, рівень технологічного забезпечення залишається недостатньо високим, а наукова база для його створення не завжди відповідає сучасним вимогам за матеріало- та енергомісткістю та іншими параметрами.

Актуальним є створення технологічного забезпечення для виготовлення нових конструкцій РО ГГК, довговічність та ресурс роботи яких підвищується за рахунок зменшення інтенсивності зношування елементів в контактних зонах. Тому, тема роботи є актуальною і має важливе значення.

**Огляд останніх джерел і публікацій.** Досліджено характерні конструктивні особливості ГГК, технічні вимоги, норми точності, проаналізовано технологічні процеси їх виготовлення. Основними технічними вимогами до конструкцій ГГК є забезпечення належних умов експлуатації, точності виготовлення за 8–10 квалітетами, шорсткості  $Ra = 0,8 \dots 1,25$  мкм. Дослідженням технологічних процесів виготовлення гвинтових заготовок займались Б.М. Гевко, М.І. Пилипець, Гевко І.Б. [1–4].