

М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ, д-р техн. наук (ОИМ НАН Беларуси)

## ФОРМИРОВАНИЕ ГРАДИЕНТНЫХ ПОКРЫТИЙ ГАЗОПЛАМЕННЫМ НАПЫЛЕНИЕМ И ГИПЕРЗВУКОВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИЕЙ\*

**Введение.** Совершенствование технологий и повышение производительности листопрокатного производства, обработки металлов давлением, переработки сельскохозяйственной продукции непосредственно зависят от характеристик используемого технологического оборудования и его составляющих. Для обеспечения заданных параметров точности и качества элементы технологического оборудования должны иметь высокие показатели надежности. Их рабочие поверхности испытывают одновременное воздействие высоких силовых нагрузок (от 5 до 50 МПа) и температуры (от 460 до 1140 К), вступают во взаимодействие с обрабатываемым материалом и реагентами из окружающей среды, что выражается в интенсивном протекании процессов диффузии, окисления, коррозии и др. [1, 2].

Согласно классической диаграмме «твердость-прочность» для традиционных материалов (рисунок 1), по которой рост твердости сопровождается потерей прочности, сформулированный комплекс требований к деталям прокатного оборудования является невыполнимым для компактного материала.



Рисунок 1 – Взаимосвязь механических свойств материалов

Одним из путей повышения прочности и надежности нагруженной деталей, приближающим их к области «идеальных свойств», является применение износ- и коррозионностойких покрытий [3]. Решением, позволяющим объединить взаимоисключающие свойства в одном изделии и подняться до «идеальной» области диаграммы, представляется получение композиционной детали, основой у которой является сталь с высокой прочностью на изгиб, а рабочий слой обладает всеми требуемыми физико-механическими свойствами и необходимым коэффициентом трения.

Однако постоянно расширяющиеся диапазоны рабочих нагрузок и их динамического спектра, скоростей скольжения, температур и сред не позволяют решить все проблемы путем формирования монопокрытий – рабочих слоев с постоянными по сечению свойствами. Это обусловило все большее распространение в последние годы технологий нанесения комбинированных покрытий [4], состоящих из двух или нескольких функциональных слоев. Многослойность позволила удовлетворить взаимоисключающие требования к покрытиям, например, необходимость высокой адгезионной прочности с основой и низкого коэффициента сухого трения рабочей поверхности, обеспечиваемого только присутствием твердых смазок. При этом промежуточные слои могут дополнительно выполнять роль связующих слоев, тепловых барьеров или слоев, препятствующих продвижению трещин при разрушении покрытий [4].

Комбинированные покрытия позволяют многократно повысить эксплуатационные свойства поверхности за счет плавного увеличения (изменения) свойств основы и последующего нанесения, например, более износостойкого покрытия [5]. Значительное улучшение свойств покрытий возможно также и за счет постепенного снижения напряжений от поверхности до границы с основой [6].

Одними из наиболее эффективных методов формирования комбинированных покрытий являются технологии газотермического напыления (ГТН), позволяющие формировать покрытия из металлов, сплавов, керамики, полимеров [7]. В процессе ГТН можно менять производительность и фазовый состав наносимых материалов, регулировать пористость, обеспечивать необходимый градиент физико-механических характеристик по сечению покрытий. В по-

следние годы все большее применение находят газотермические технологии при восстановлении-упрочнении деталей технологического оборудования металлургического производства [8], что свидетельствует об их широких возможностях и технико-экономических достоинствах.

**Градиентные покрытия для узлов трения скольжения.** Одним из основных требований, которому должны удовлетворять поверхностные слои деталей трибосопряжений, является пластичность в начальный период трения для ускорения процесса приработки, и высокая износостойкость, твердость, адгезия к жидким смазкам в ходе дальнейшей работы узла. Выполнение этого условия применительно к сталям возможно только в том случае, когда в сталях сформирована двухфазная структура, содержащая метастабильный аустенит, имеющий твердость 200–300 HV. В процессе приработки вследствие интенсивной пластической деформации метастабильный аустенит в поверхностном слое трансформируется в износостойкий и твердый мартенсит ( $HV = 700\text{--}800$ ) за счет протекания деформационного  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения. При этом твердость приработанной поверхности трения выходит на уровень, недостижимый при обычных методах обработки покрытий.

Проведенные исследования позволили предположить, что как для метода газопламенного проволочного напыления (ГПН) [9], так и для процесса гиперзвуковой металлизации (ГМ) [10] существуют такие режимы и распыляемые стали, позволяющие обеспечивать формирование градиентных покрытий путем образования большого количества метастабильного аустенита, который в поверхностном слое в процессе работы трибосопряжения перейдет в мартенсит.

Результаты исследования фазового состава и твердости покрытий из сталей мартенситного класса свидетельствуют о существенном влиянии режима напыления на структуру и свойства слоя. Отличительной особенностью напыленных слоев является присутствие в них аномально большого количества остаточного аустенита (20–40 об.%) и оксидов. Обычно содержание остаточного аустенита, например, в закаленной стали 40X13 значительно меньше.

Одной из наиболее вероятных причин появления «аустенитного эффекта» в покрытиях является относительно более высокая концентрация в них легирующих элементов (хрома и углерода) за счет полного растворения карбидов хрома при расплавлении проволоки

и насыщения каплей расплава углеродом из пламени пропана. Об этом, в частности, свидетельствует отсутствие в покрытии частиц карбидов  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ . Далее, при анализе причин стабилизации аустенита в слое, необходимо иметь ввиду, что при нанесении покрытия поверхностные слои композита разогреваются до температур 500–670 К. Вследствие этого напыленное покрытие в процессе его формирования и охлаждения проходит стадию изотермической выдержки при 520–670 К, что способствует термической стабилизации аустенита.

Относительно низкая скорость полета расплавленных частиц стали, а также высокая концентрация углеродсодержащего пропана в продуктах горения способствует более глубокому насыщению каплей расплава углеродом. Очевидно, что именно с этими обстоятельствами связано наиболее высокое содержание остаточного аустенита в покрытиях, полученных по технологии газопламенного напыления (30–40 об.%). Несколько меньшее количество аустенита в покрытиях, полученных гиперзвуковой металлизацией в восстановительной атмосфере распыляющего факела (20–25 об.%), обусловлено, по-видимому, существенно более высокой скоростью полета расплавленных частиц, характерной для данного способа напыления. В этом случае процессы диффузионного насыщения каплей расплава углеродом из восстановительной атмосферы продуктов сгорания пропано-воздушной смеси пройти не успевают (время пролета расплавленных каплей в атмосфере продуктов сгорания не более  $5 \cdot 10^{-4}$  с) и содержание остаточного аустенита в слое снижается до ~ 20 об.%.

Поскольку мартенситное  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращение может происходить при интенсивном пластическом течении, исследовалась возможность распада остаточного аустенита за счет поверхностного деформирования.

Напыленные покрытия в исходном состоянии имели твердость 360–380 МПа, микротвердость  $\text{HV}_{30} = 2650$  МПа, содержание остаточного аустенита 40–45 об.%. После шестикратной обкатки шариком диаметром 5 мм с усилием около 1900 Н твердость покрытий составила 8000–8500 МПа, микротвердость  $\text{HV}_{0,5} = 4100$ –4500 МПа, а количество остаточного аустенита снизилось до 8 об.%. Таким образом, метод ППД можно рекомендовать для повышения механи-

ческих характеристик поверхностных слоев газотермических покрытий из сталей мартенситного класса.

В ходе триботехнических испытаний напыленных покрытий была установлена возможность трансформации остаточного аустенита при трении в мартенсит [11], что позволяет осуществлять упрочнение покрытий непосредственно в трибосопряжениях в ходе приработки.

В литых сталях получение метастабильного аустенита достигается путем специального легирования, сложной термической и термомеханической обработкой, проведение которой зачастую экономически не целесообразно. Для обеспечения формирования в структуре напыленного покрытия метастабильного аустенита, имеющего низкую температуру протекания деформационного  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения (температура  $M_d$ ), соответствующую температурам эксплуатации узлов трения скольжения (270–320 К), необходимо достижение определенных условий формирования покрытия, а именно, температуры нагрева  $T_n$  (перегрева выше точки плавления) проволоки, ее распыления, скорости охлаждения расплавленных частиц и степени их окисления, приводящих к изменению концентрации легирующих элементов.

У легированных конструкционных сталей, а также у коррозионно-стойких сталей мартенситного класса температура  $T_m$  находится в пределах 550–700 К. При распылении проволок из этих сталей установлено, что объемное содержание метастабильного аустенита достигает 24 % , если температура нагрева проволоки не превышает 2000 К.

Температура  $T_m$  у инструментальных сталей (штамповых), а также у конструкционных рессорно-пружинных сталей находится в пределах 420–540 К. При распылении этих сталей отмечено что образование метастабильного аустенита в количестве 15–25 об.% возможно, если распыляемая проволока нагрета до температуры не выше 2100 К.

У коррозионно-стойких и жаростойких сталей и у стали Гадфильда температура  $T_m$  составляет 70–110 К. Для фазового упрочнения поверхностных слоев сталей аустенитного класса за счет протекания мартенситного превращения требуются высокие степени деформации, недостижимые при фрикционном взаимодействии со

смазочным материалом (граничное трение). Установлено, что путем термораспыления проволок из этих сталей при температурах более 2500 К можно повысить температуры  $T_m$ ,  $M_d$  и осуществить дестабилизацию аустенитной фазы в формируемых покрытиях.

Математическая обработка полученных экспериментальных результатов позволила получить выражение, описывающее зависимость необходимой температуры нагрева проволоки от температуры начала мартенситного превращения стали, из которой изготовлена проволока:

$$T_H = \frac{\beta T_i (T_i + T_M)}{T_M},$$

где  $T_H$  – температура нагрева, К;  $T_M$  – температура начала мартенситного превращения, К;  $\beta$  – коэффициент, численно равный 19,5–20,4;  $T_i$  – коэффициент, численно равный 79–82 К.

Используя результаты проведенных исследований, разработан способ формирования износостойких покрытий [12] и технологические рекомендации по восстановлению – упрочнению деталей узлов трения скольжения [13].

**Послойное напыление износостойких покрытий.** При традиционной схеме реализации методов распыления стальных проволок максимальная достигаемая твердость покрытий составляет от 30 до 50 HRC<sub>э</sub>. Несмотря на доступность используемых материалов, высокую плотность, адгезию и минимальную удельную стоимость проволочных покрытий, их износостойкость ниже, чем у напыленных композиционных слоев из шнуровых материалов или порошков, что резко ограничивает эффективность и область применения термоструйных технологий.

В настоящее время известен ряд методов увеличения прочности и износостойкости поверхностных слоев металлических материалов, однако их применимость к решению указанной проблемы ограничена. Традиционные методы химико-термической обработки, имеют высокую температуру обработки, приводящую к деформации изделий. Лазерная и электронно-лучевая обработка помимо высокой стоимости, приводят к неоднородной гетерогенной макроструктуре поверхности.

Для повышения физико-механических характеристик напыляемых проволочных покрытий используют композиционные порошковые проволоки, представляющие собой металлическую оболочку, заполненную порошковой шихтой определенного состава (рисунок 2).

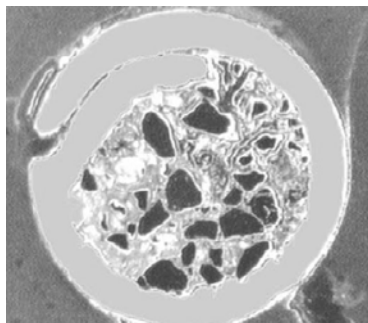


Рисунок 2 – Микршлиф среза композиционной порошковой проволоки (×60)

Композиционные проволоки выпускают для формирования покрытий твердостью от 48 до 65 HRCэ, а также коррозионной стойкостью, не уступающей гальваническим хромовым покрытиям. Основными производителями композиционных порошковых проволок в мире являются компании: Sulzer Metco (США), Powder Alloy Corporation (США), Praxair Surface Technologies (США), TAFA (США), Boeing (США), Durum (ФРГ), Kanthal (Швеция).

Для нанесения покрытий использована экспериментальная модель установки для гиперзвуковой металлизации, в качестве распыляемых материалов использованы композиционные проволоки Днепропетровского ЗАО «Спецсплав», фирм «Durum», «Sulzer Metco» и ЗАО «Березовский завод сварочных материалов» (Свердловская обл.).

Состав напыляемых проволок:

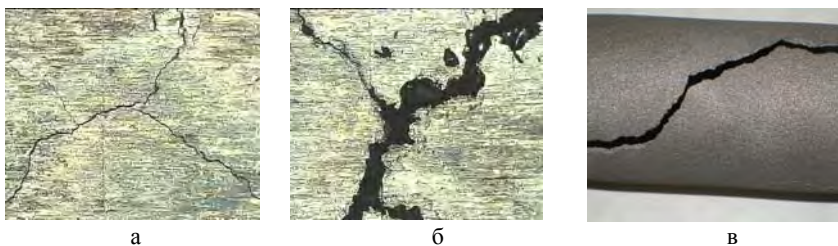
- ЗАО «Спецсплав» PST – 5 (состав Ni – 4,86 %; Cr – 11,8 %; W – 3,7 %; Nb – 2,21 %; Ti – 0,45 %; Mo – 0,11 %; Al – 0,56 %; C – 0,17 %; Fe – основа); PST – 350 Т (состав WC – 20 %; Cr – 4 %; Ni – 0,8 %; Ti – 0,2 %; Co – 0,6 %; V – 0,3 %; Mn – 0,5 %; Si – 0,5 %; Fe – основа).

- DURMAT AS-897 (состав: Si 1,25/ Ni 4,5/ Cr 14/ Mn 5,5/ B 1,85/ W 26/ Ti<sub>2</sub>C<sub>3</sub> 6/ Fe); DURMAT AS-815 (состав: C 4,8/ Cr 28/ Si 1,4/ B /Fe) и

- Sulzer Metco 8297 (состав: Si/ Cr 14/ Ni 5/ B 1,5/ WC 25 + TiC 5 / Fe).

- ЗАО «БЗСМ» ПП-ЗСМ-111 (состав: C 2,1/ Cr 8/ Ti 2/ B 1,5).

Первые эксперименты показали, что чем больше карбидообразующих и тугоплавких элементов в материале композиционной проволоки, тем более она чувствительна к толщине наносимого покрытия. Так практически не удавалось получить из материала DURMAT AS-897 покрытия толщиной более 1,1 мм. После напыления слоя толщиной около 0,9 мм на нем появлялись микротрещины, после напыления 1 мм – они увеличивались в размерах и при достижении толщины 1,1 мм покрытие лопалось (рисунок 3).



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

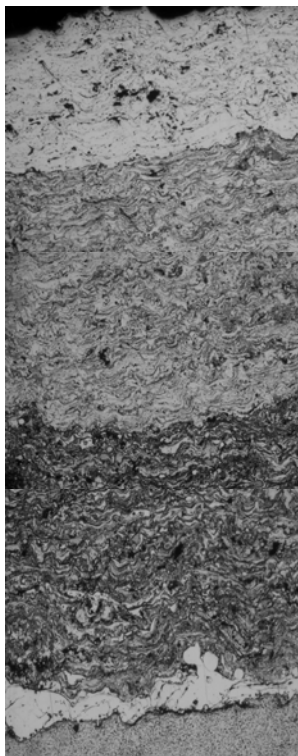
Рисунок 3 – Рост трещины в покрытии, полученном напылением материала DURMAT AS-897

Менее легированные материалы позволяли получать покрытия до 2 мм, однако для этого необходимо уменьшать толщину формируемого за один проход слоя, увеличивать количество проходов и непрерывно контролировать теплонагруженность образца.

Для восстановления-упрочнения деталей с износом рабочих поверхностей более 0,5 мм предложена следующая технология. На подготовленную поверхность детали наносится подслоя распылением проволоки из никель-хромового сплава, обеспечивающий 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, обеспечивающей требуемую износостойкость и коррозионную стойкость покрытия (рисунок 4). Такая комбинация слоев, помимо экономической выгоды (снижается общая стоимость покрытия), обуславливает возможность эксплуатации покрытия в условиях абразивного изнашивания и ударных нагрузок.



Слой DURMAT AS-897

Слой из стали 40X13

Слой из порошковой проволоки  
30X20NM

Подслой из X20H80

Основа

Рисунок 4 – Микроструктура многослойного покрытия

Экспериментальные исследования показали, что не все композиционные порошковые проволоки можно использовать в процессах газотермического напыления покрытий, особенно гиперзвуковой металлизации. Материалы, выпускаемые фирмами Sulzer Metco,

Durum или Kanthal, содержат частицы наполнителя размером от 20 до 50 мкм, а большинство порошковых проволок, выпускающихся в России и на Украине, предназначены для процессов наплавки и наполнены износостойкими частицами размером от 200 мкм и выше. При этом общая объемная концентрация наполнителей во всех марках может совпадать. Установлено (рисунок 5), что при высокой скорости эвакуации из зоны дуги крупные частицы не успевают прогреться, и не участвуют в процессе формирования покрытия, образуяющегося практически только из материала оболочки.

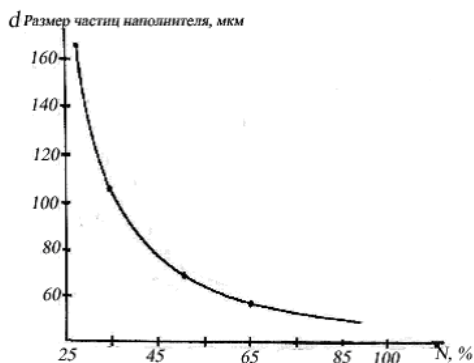


Рисунок 5 – Зависимость количества порошкового наполнителя, попадающего в напыляемое покрытие, от среднего размера его частиц

Анализ приведенных на рисунке 5 данных показывает, что порошковый наполнитель в композиционной проволоке, распыляемой гиперзвуковой металлизацией, должен иметь размеры не более 50 мкм.

**Получение градиентных покрытий модифицированием напыленных слоев.** Эффективным путем решения задачи повышения эксплуатационных характеристик газотермических покрытий из проволочных материалов может явиться формирование в них высокопрочных поверхностных слоев с многослойной структурой посредством использования различных экономичных методов поверхностного модифицирования и химико-термической обработки. Было предположено, что покрытия, представляющие собой слоистые композиты типа «металл – металл + карбид» и «металл – оксидоке-

рамика», могут обладать таким комплексом свойств, который не обеспечивается нанесением монослоев, или возможен лишь при использовании дорогостоящих высокоэнергетических методов формирования покрытий.

Исследован процесс повышения физико-механических свойств покрытий, полученных распылением проволок из алюминия и его сплавов путем микродугового оксидирования [14]. Установлено влияние пористости напыленного покрытия и содержания кислорода на толщину оксидированного слоя (рисунок 6). Показано, что для формирования на алюминиевых покрытиях оксидированных слоев толщиной 350–400 мкм и микротвердостью 12–15 ГПа необходимо при напылении обеспечить пористость покрытий в пределах 8–12 % при содержании кислорода не более 0,5–0,7 об. %.

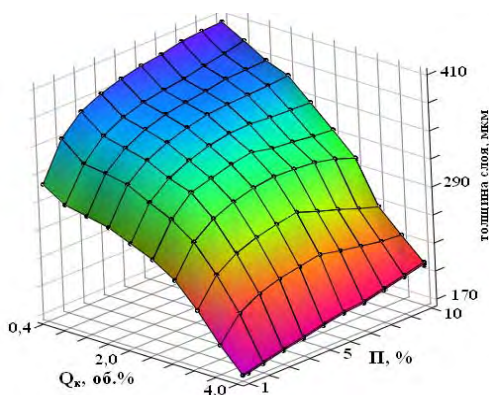


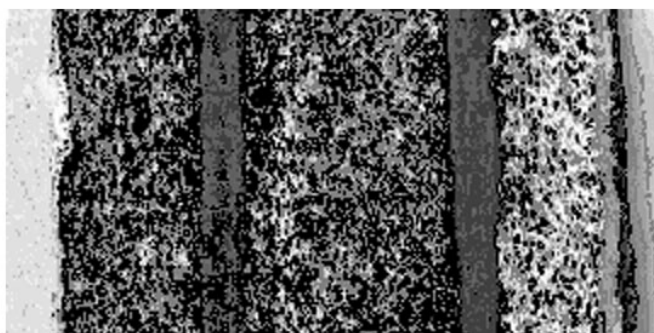
Рисунок 6 – Зависимость толщины слоя  $Al_2O_3$  от пористости и количества кислорода в напыленных покрытиях из алюминия

Триботехническими испытаниями установлено, что износостойкость оксидированного слоя в два и более раз выше, чем износостойкость высокопрочного чугуна марки ВЧ50-7, закаленного до твердости HRC 50–55.

Поскольку толщина слоя твердого оксида не превышает 200–250 мкм, что обусловлено природой процесса микроплазменной обработки, была произведена оценка возможности напыления на оксидированный слой алюминиевого покрытия, его оксидирования, напыления следующего покрытия и т.д. Был получен много-

слойный композит (рисунок 7), причем установлено, что после струйно-абразивной обработки адгезия напыленного алюминиевого покрытия к оксиду составляет 20–25 МПа.

Поскольку высотой напыленного покрытия алюминия можно легко управлять как в процессе напыления, так и путем последующей механической обработки, появилась возможность формирования достаточно «толстых» слоев керамики (до 1,5 мм) с тонкими (10–40 мкм) прослойками алюминия.



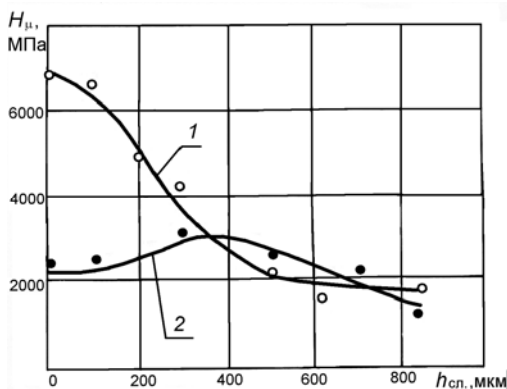
Основа Напыляемый слой Al Керамика  $Al_2O_3$  Напыляемый слой Керамика Напыляемый слой

Рисунок 7 – Многослойный композит

Показано, что методы активированного распыления стальных проволок (газопламенное напыление и гиперзвуковая металлизация) с последующим ионно-лучевым азотированием позволяют обеспечить формирование покрытий с поверхностным слоем твердостью от 6500 до 15000 МПа и толщиной от 5 до 40 мкм [15]. Установлено, что для повышения эффективности процесса модифицирования стальных покрытий ионно-лучевым азотированием необходимо использовать покрытия пористостью не более 8–11 %, предварительно импрегнированные насыщенным водным раствором хлористого аммония [16], что позволяет обеспечить формирование поверхностных слоев с микротвердостью 6,5–15,0 ГПа и толщиной 5–40 мкм. Износостойкость покрытий из сталей 40X13 и X18H10T после ионно-лучевого азотирования повышается в 8 раз. Количество окислов в покрытиях не изменяется после ионно-

лучевой обработки и благоприятно сказывается на работоспособности покрытий в условиях сухого трения на воздухе.

Определено, что в результате химико-термической обработки карбонитрованием стальных покрытий пористостью от 5 до 14 % их прочность сцепления увеличивается в 1,5–1,7 раза, при этом на покрытиях из сталей мартенситного класса образуются модифицированные поверхностные слои толщиной 100–120 мкм и микротвердостью 7,5–7,7 ГПа, что обеспечивает повышение износостойкости более чем в 2,5 раза. Насыщение углеродом и азотом покрытий из низколегированных сталей ферритного класса приводит к образованию диффузионного слоя толщиной до 200 мкм с микротвердостью 6,5–7,0 ГПа (рисунок 8), при этом износостойкость повышается в 15–20 раз.



1 – покрытие после карбонитрования; 2 – исходное состояние покрытия

Рисунок 8 – Распределение микротвердости по глубине модифицированных покрытий из стали Св-08Г2С

**Выводы.** Показано, что одними из наиболее эффективных и экономичных методов формирования градиентных комбинированных покрытий являются технологии активированного газопламенного напыления и гиперзвуковой металлизации, использующие в качестве наносимых материалов гомогенные и композиционные проволоочные материалы. В процессе формирования покрытий распылением стальных проволоочных материалов обеспечиваются ус-

ловия, обуславливающие повышенное содержание метастабильного аустенита, способного претерпевать  $\gamma$ - $\alpha$ -превращение при деформационном воздействии в трибосопряжениях. Установлено явление аномально высокого содержания остаточного аустенита (20–40 об.%) в покрытиях, полученных активированным распылением проволок из хромсодержащих сталей мартенситного класса.

Установлена зависимость количества частиц порошкового наполнителя композиционных проволок, попадающих в покрытие, от их размера. Показано, что при гиперзвуковой металлизации необходимо использовать порошковые проволоки с размерами частиц наполнителя менее 50 мкм. Для восстановления – упрочнения деталей с износом рабочих поверхностей более 0,5 мм предложена технология формирования высокопрочных износостойких покрытий, включающая послойное распыление гомогенных и композиционных проволок.

В результате экспериментальных исследований влияния модифицирующего воздействия микроплазменной обработки, ионно-лучевого азотирования, карбонитрирования на физико-механические свойства газотермических проволочных покрытий установлен эффект интенсификации механизма насыщения покрытий по сравнению с компактными материалами (ускорение процессов в 1,16–1,35 раз), обусловленный высоким уровнем дефектности и структурными особенностями покрытий. Установлены режимы формирования оксидированных слоев на напыленных алюминиевых покрытиях, режимы ионно-лучевого азотирования и карбонитрирования покрытий, полученных распылением проволок из сталей различных классов.

## Литература

1. **Когаев, В.П.** Прочность и износостойкость деталей машин / В.П. Когаев, Ю.Н. Дроздов. – М.: Высш. шк., 1991. – 319 с.
2. **Восстановление** деталей машин: Справочник / Ф.И. Пантеленко [и др.]; под ред. В.П. Иванова – М.: Машиностроение, 2003. – 672 с.
3. **Витязь, П.А.** Основы нанесения износостойких, коррозионно-стойких и теплозащитных покрытий / П.А. Витязь, А.Ф. Ильющенко, А.И. Шевцов – Минск. – Бел. наука, 2006. – 363 с.

**4. Фукс-Рабинович, Г.С.** Особенности структуры и свойств комбинированных покрытий для режущего инструмента / Г.С. Фукс-Рабинович // Трение и износ. – 1994. – Т. 15, № 6. – С. 994–1009.

**5. Кудинов, В.В.** Нанесение покрытий напылением. Теория, технология, оборудование / В.В. Кудинов, Г.В. Бобров. – М.: Металлургия, 1992. – 432 с.

**6. Pawlowsky, L.** The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings / L. Pawlowsky. – Wiley, UK. 1994. – 402 p.

**7. Формирование** газотермических покрытий: теория и практика / А.Ф. Ильющенко [и др.] – Минск: Бестпринт, 2002. – 480 с.

**8. Структура** и свойства покрытий, напыленных на детали металлургического оборудования / Ф.И. Щедрин [и др.] // Ремонт и эксплуатация металлургического оборудования. – М.: Металлургия. – 1986. – С. 93–96.

**9. Белоцерковский, М.А.** Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий / М.А. Белоцерковский. – Минск: Технопринт. – 2004. – 200 с.

**10. Нанесение** коррозионно-стойкого покрытия на высокопрочный чугун с шаровидным графитом методом гиперзвуковой металлизации / М.А. Белоцерковский, А.С. Прядко [и др.] // Металлургия: Республ. межведом. сб. научн. тр.: в 2 ч. – Минск: БНТУ, 2013. – Вып. 34, ч. 2. С. 15–26.

**11. Ways of Improving** the Tribological Properties of Steel Gas-Flame Coatings / P.A. Vityaz [et al.] // Journal of Friction and Wear. – 2011. – Vol. 32, No. 6. – P. 395–403.

**12. Способ** получения износостойкого металлического покрытия на деталях трибосопряжений: пат. 11663 Респ. Беларусь, МПК С 23 С 4/12 / М.А. Белоцерковский, В.А. Кукареко, А.С. Прядко; заявитель Объединенный ин-т машиностроения НАН Беларуси. – № а 20060803; заявл. 28.07.2006; опубл. 28.02.2009 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 1. – С. 98.

**13. Белоцерковский, М.А.** Технологические особенности и области использования гиперзвуковой металлизации / М.А. Белоцерковский, А.С. Прядко, А.Е. Черепко // Инновации в машиностроении: Сб. научн. тр., Минск, 30–31 октября 2008 г. / Редкол.: М.С. Высоцкий [и др.]. – Минск: ОИМ НАН Беларуси, 2008. – С. 479–484.

**14. Способ** формирования износостойкого покрытия: пат. 2234382 РФ, МПК В 05 D 5/08 / П.А. Витязь, М.А. Белоцерковский, В.Л. Басинюк, Е.И. Мардосевич; заявитель ИНДМАШ НАН Беларуси. – № 2002128900; заявл. 28.10.2002; опубл. 20.08.2004 // Бюллетень / Фед. институт промышл. собственности. – 2004. – № 23. – С. 341.

**15. Способ** получения износостойкого покрытия: пат. 9465 Респ. Беларусь, МПК С 23 С 4/18 / П.А. Витязь, М.А. Белоцерковский, А.В. Белый, В.А. Кукареко; заявитель Объединенный ин-т машиностроения НАН Беларуси. – № 20030256; заявл. 21.03.2003; опубл. 30.06.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 3. – С. 102.

**16. Способ** получения износостойкого стального покрытия: пат. 11776 Респ. Беларусь, МПК С 23 С 4/06 / М.А. Белоцерковский, А. Патеюк, А.В. Белый, В.А. Кукареко; заявитель Объединенный ин-т машиностроения НАН Беларуси. – № а 20070688; заявл. 06.06.2007; опубл. 30.04.2009 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 4. – С. 142.

*УДК669.018.95+620.178.162*

**В.И. ЖОРНИК, д-р техн. наук (ОИМ НАН Беларуси)**

## **ВЛИЯНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ УГЛЕРОДНЫХ ДОБАВОК НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СПЕЧЕННОГО ТВЕРДОГО СПЛАВА**

**Введение.** К числу эффективных методов повышения свойств спеченных сплавов относится их модифицирование наноразмерными добавками. При этом в качестве модифицирующих добавок могут выступать наноразмерные частицы металлов, оксидов, углеродных материалов и др. [1–3]. Наноразмерные добавки способны оказывать влияние на протекание диффузии и химических превращений, активируя процессы уплотнения материала и низкотемпературного сплавообразования в порошковой системе. Введение наноразмерных добавок в состав шихты может осуществляться осаждением из коллоидных растворов, в процессе термического