

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И ОПТИМИЗАЦИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ
ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ САМОФЛЮСУЮЩЕГОСЯ СПЛАВА,
МОДИФИЦИРОВАННЫХ ТВЕРДЫМИ ТУГОПЛАВКИМИ СОЕДИНЕНИЯМИ

А. Ф. Ильющенко¹, А. И. Шевцов¹, В. М. Асташинский², А. М. Кузьмицкий², Л. В. Маркова¹,
А. И. Лецко¹, К. В. Буйкус³, Т. А. Леонова¹, А. А. Козорез³

¹Институт порошковой металлургии, ул. Платонова, 41, 220005, г. Минск, Беларусь

²Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова, ул. П. Бровки, 15, 220072, г. Минск, Беларусь

³Белорусский национальный технический университет, пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь

Поступила 04.09.2017 г.

Исследованы процессы и оптимизированы технологические параметры обработки импульсами компрессионной плазменной струи газотермических покрытий на основе сплава NiCrBSi с твердыми тугоплавкими включениями TiC. Изучены свойства покрытий, полученных при оптимизированных технологических параметрах.

Введение. Цель работы – разработка композиционных газотермических покрытий повышенной износостойкости на основе самофлюсующегося сплава, модифицированных твердыми тугоплавкими соединениями и импульсными высокоэнергетическими воздействиями.

Улучшение структуры и качества упомянутых покрытий может быть достигнуто путем воздействия на них импульсами компрессионной плазменной струи. Об этом свидетельствуют результаты наших исследований, изложенные в монографиях [1, 2]. Механизм процессов импульсно-плазменной обработки базируется на послойном оплавлении и сверхбыстром охлаждении слоев покрытия, в которых происходит измельчение зеренной структуры до нанокристаллического уровня, формируются аморфные фазы. Указанные процессы с модифицированием тонкой структуры способствуют повышению прочности и износостойкости покрытий. Эффективность процессов обеспечивается оптимизацией технологических параметров импульсно-плазменных воздействий. К основным параметрам относятся дистанция воздействий и суммарное количество импульсов, оптимизация которых отражена в статье.

При изучении свойств газотермических покрытий ПР – H70X17C4P4 – 3 + 40 % TiC, модифицированных на оптимальных режимах, выполнен металлографический анализ образцов,

изучена их тонкая структура. Аморфизация или близкое к ней нанокристаллическое строение образцов покрытий подтверждены результатами исследования тонкой структуры с определением (ОКР) рентгеновской съемки. Показано, что степень аморфизации газотермических покрытий ПР – H70X17C4P4 – 3 + 40 % TiC после импульсно-плазменных воздействий возрастает с улучшением качества нанесенных композиций триботехнического применения.

Изготовление экспериментальных образцов. Одну из торцевых поверхностей стальных образцов длиной 12 мм и диаметром 10 мм подвергали струйно-абразивной обработке зернами электрокорунда (давление сжатого воздуха 0,4–0,6 МПа; угол атаки струи 60–90 град.; дистанция обработки 100–120 мм; расход абразива 3–5 кг/ч; шероховатость подготовленной поверхности R_a 12,5–25 мкм). Затем на торец образца газотермическим напылением наносили покрытие (табл. 1).

На газотермические покрытия толщиной ~ 0,6 мм воздействовали импульсами компрессионной плазменной струи, полученными с помощью газоразрядного квазистационарного ускорителя типа магнитоплазменный компрессор (МПК). В этой установке ускорение плазмы сопровождается ее сжатием за срезом внутреннего электрода вследствие взаимодействия продоль-

Таблица 1. Режимы напыления

Распыляемый материал	Технология	Режим				
		Ток дуги плазмотрона, А	Напряжение дуги, В	Расход плазмобразующего газа азота, л/мин	Расход распыляемого порошка, усл. единицы	Дистанция напыления, мм
ПР-Н70Х17С4Р4-3+ +32,4 %Ti+7,6 %С/ ПР-Н70Х17С4Р4-3+ +40 %TiС	Плазменная					
	УПУ – 3Д	250/260	75/75	40/45	29/26	150/150
ПР-Н70Х17С4Р4-3+ +32,4 %Ti+7,6 %С	Газопламенная	Давление/ расход кислорода МПа/ л/мин	Давление/ расход МАФ МПа/ л/мин	Давление/ расход воздуха МПа/ л/мин	Расход распыляемого порошка, кг/ч	Дистанция напыления, мм
	УПТР 83	0,34/33	0,1/13	0,1/17	6 (5)	180 (175)

Примечание. В скобках указаны отличающиеся режимы газопламенного напыления порошка ПР-Н70Х17С4Р4-3+40 %TiС.

ной составляющей тока с собственным азимутальным магнитным полем. В результате за срезом внутреннего электрода (катода) формируется компрессионный плазменный поток, параметры плазмы в котором существенно выше, чем в межэлектродном промежутке.

Амплитудное значение разрядного тока МПК составляло 240 кА при начальном напряжении накопителя энергии 4,5 кВ, длительность разряда ~ 150 мкс. В указанных условиях на выходе разрядного устройства МПК формируется компрессионный плазменный поток диаметром 1 см и длиной 10 см. Плотность энергии импульсных воздействий составляла $5 \cdot 10^5$ Вт/см².

МПК работал в режиме «остаточного газа», при котором предварительно откачанную вакуумную камеру установки заполняли азотом до давления 400 Па. На рис. 1 представлена импульсно-плазменная обработка образца газотермического покрытия.

Исследование процессов и оптимизация технологических параметров импульсно-плаз-

менной обработки газотермических покрытий на основе сплава NiCrBSi с твердыми тугоплавкими включениями TiC. Методика оптимизации базируется на необходимости получения упрочненных аморфных или близких к ним нанокристаллических структур. Для этого наиболее приемлемы жесткие режимы воздействий, критерием оптимизации которых служит максимальная степень локального оплавления и уплотнения распыленных композиций. Чем выше степень импульсного кратковременного оплавления композиции, содержащей различные фазы (в том числе тугоплавкие), тем больше центров последующей кристаллизации (аморфизации) материала, из которых при сверхбыстром охлаждении развиваются упрочненные структуры со сниженной пористостью и повышенной микротвердостью.

Для достижения структурообразования, соответствующего критерию оптимизации режимов, увеличивают уровень теплового и ударно-волнового воздействия импульсами плазмы

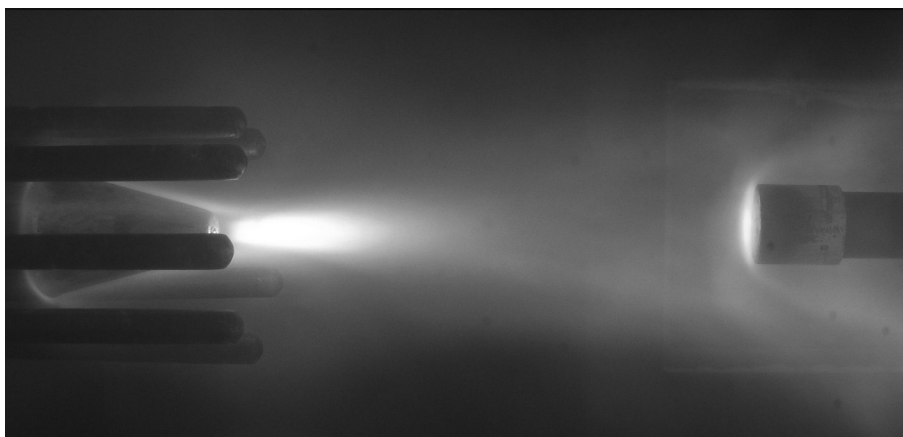
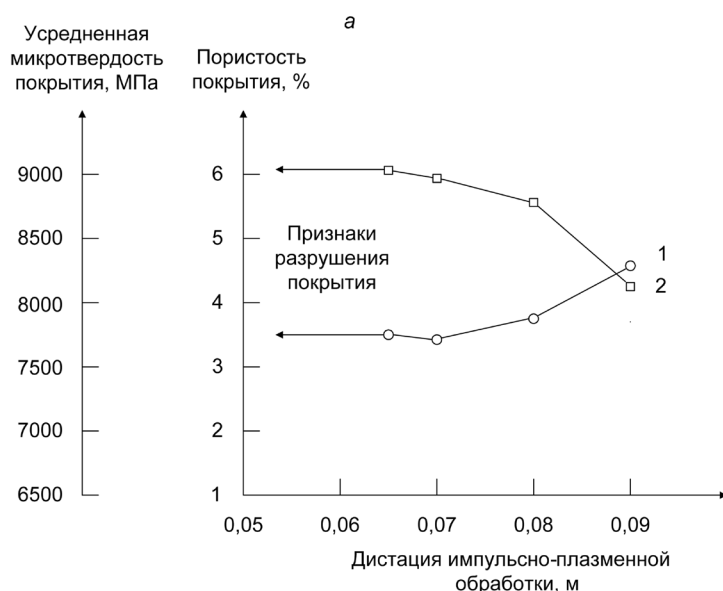
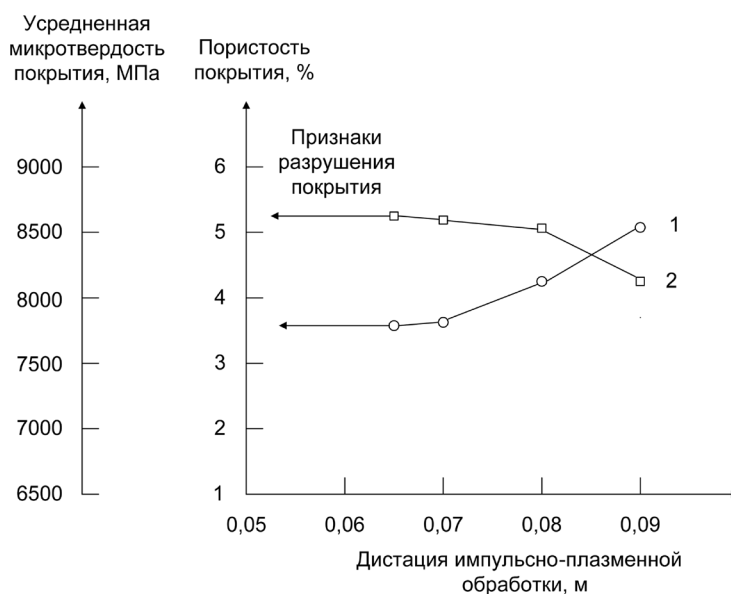


Рис. 1. Импульсно-плазменная обработка покрытия

с уменьшением дистанции обработки до минимального значения. Вместе с тем уменьшение дистанции ограничивается появлением признаков разрушения покрытий (например, развиваются трещины).

Образцы покрытий, о которых упоминалось, обрабатывали импульсами плазменной струи, полученными с помощью газоразрядного квазистационарного ускорителя типа МПК. Дистанцию обработки варьировали и оптимизировали по принятому критерию с анализом пористости

и микротвердости покрытий. В качестве исследовательского оборудования для изучения свойств модифицированных покрытий применялись металлографический микроскоп «MeF-3», анализатор изображений MIRA TESCAN, микротвердомер «Micromet-II» (нагрузка 100 г на индентор). Один из примеров результатов исследований представлен на рис. 2, из которого видно, что оптимальные дистанции импульсно-плазменной обработки покрытий, полученных плазменным напылением, находятся в пределах 0,07–



б

Рис. 2. Зависимость пористости (1) и микротвердости (2) модифицированных покрытий: а, б – покрытия полученные плазменным распылением порошков ПР-Н70Х17С4Р4-3 + 32,4 % Ti + 7,6 % С и ПР-Н70Х17С4Р4 -3 + 40 % TiС соответственно

0,08 м. Об этом свидетельствует стабилизация пористости и микротвердости как критерии оптимизации.

При дистанциях ниже 0,07 м существенные изменения показателей пористости и микротвердости практически не происходят. Это, очевидно, объясняется кратковременностью тепловых и динамических импульсных воздействий (~ 150 мкс), а также большим содержанием в покрытиях тугоплавкой и твердой карбидной фазы (~ 40 %). Значимое возрастание степени оплавления, уплотнения и модифицирования структуры покрытий не имеет места. Кроме того, при дистанциях $\leq 0,065$ м наблюдается разрушение покрытий с развитием трещин.

В табл. 2 приведена обобщенная информация по результатам оптимизации дистанции импульсно-плазменной обработки для различных покрытий.

Важным режимом модифицирования газотермических покрытий является суммарное количество воздействий на них импульсами компрессионной плазменной струи. Указанный режим оказывает влияние на толщину модифицированных слоев предлагаемых износостойких покрытий, для которых необходимы повышенные когезионная и адгезионная прочности. Поэтому суммарное количество импульсов должно обеспечить оплавление и уплотнение покрытий по всей толщине, что будет в полной мере способствовать получению упрочненных структур за счет факторов, о которых упоминалось выше.

Оптимизация режима с применением традиционного эксперимента относится к достаточно трудоемким исследованиям, так как возникает необходимость выполнения металлографического анализа каждого из общего количества моди-

фицированных слоев. Для снижения расхода энергии и затрат на дорогостоящие материалы целесообразно моделирование импульсно-плазменных воздействий с уточнением установленного режима по методике, изложенной в источнике [3]. Моделирование проводилось в два этапа с математическим описанием передачи энергии импульса в покрытие, а также с описанием нагрева напыленного материала за счет переданной энергии. Информация по основным уравнениям моделирования с учетом наших теоретических исследований, изложенных в монографиях [2, 4], приведена в табл. 3.

Необходимо отметить, что плотность тепловой мощности q_{mLT} , рассчитанная по уравнению (1) табл. 3, является исходной информацией для прогнозирования нагрева газотермического покрытия и динамики температурных полей обрабатываемых слоев напыленного материала. При определении q_{mLT} в качестве L принимаем оптимальную дистанцию импульсно-плазменной обработки, установленную традиционным экспериментальным путем (табл. 2). Нагрев и динамику температурных полей, их графические зависимости строят для различных временных промежутков импульсного воздействия (t изменяется от 30 до 150 мкс). При этом используют основные уравнения (2)–(9) табл. 3 с учетом рекомендаций монографии [2]. В частности, при вычислениях применяется разностный метод решения задачи моделирования. Для вычислительного эксперимента рассмотрены передача тепловой энергии импульса и нагрев слоев газотермических покрытий, которые являются объектом исследований.

Вычислительный эксперимент проводился при следующих условиях импульсно-плазменной обработки: дистанция воздействия импуль-

Таблица 2. Обобщенная информация о полученных результатах

Газотермическое покрытие	Режимы импульсно-плазменной обработки покрытий		
	Начальное напряжение накопителя энергии, кВ	Плотность энергии импульсных воздействий, 10^5 Вт/см ²	Дистанция обработки, м
Плазменное распыление порошка ПР-Н70Х17С4Р4-3 + 32,4 % Ti + 7,6 % С	4,5	5	0,080
Плазменное распыление порошка ПР-Н70Х17С4Р4-3 + 40 % TiС	4,5	5	0,070
Газопламенное распыление порошка ПР-Н70Х17С4Р4-3 + 32,4 % Ti + 7,6 % С	4,5	5	0,085
Газопламенное распыление порошка ПР-Н70Х17С4Р4-3 + 40 % TiС	4,5	5	0,080

Таблица 3. Основные уравнения моделирования

Моделируемый процесс	Уравнения для описания процесса
<p>Передача энергии импульса плазменной струи в покрытие</p>	$q_{mLT} = 4\eta_T K \frac{W\eta_0 r_0^2}{\pi(r_0 + L \operatorname{tg} \alpha)^4}, \quad (1)$ <p>q_{mLT} – максимальная плотность тепловой мощности на оси импульса плазменного потока; η_T – тепловой КПД импульса составляет 0,3; K – поправочный коэффициент 2,0–2,2; W – энергия, запаасаемая накопителем установки МПК, зависит от суммарной емкости батареи конденсаторов C и зарядного напряжения U ($W = 0,5CU^2$); η_0 – энергетический КПД разрядного устройства ускорителя составляет $\sim 0,8$; r_0 – радиус поперечного сечения импульса плазменной струи на срезе электрода; L – дистанция обработки (расстояние от среза электрода до обрабатываемой поверхности покрытия); α – половина угла расходимости плазменного потока в его продольном сечении</p>
<p>Нагрев напыленного материала, динамика температурных полей обрабатываемых слоев покрытия</p>	$C(T)\rho(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right], \quad (2)$ $0 \leq r \leq R, \quad 0 \leq z \leq H, \quad (3)$ $z = 0, \quad 0 \leq r \leq R; \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial z} = -q_{LT}(r) + q_{\text{луч}}, \quad (4)$ $z = H, \quad 0 \leq r \leq R; \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \quad (5)$ $r = 0, \quad 0 \leq z \leq H; \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad (6)$ $r = R, \quad 0 \leq z \leq H; \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad (7)$ $t = 0, \quad T = 293\text{K}, \quad (8)$ $\frac{C(T)}{\lambda(T)} \rho \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \frac{1}{\eta^2} \left(\frac{e^\eta - 1}{He^{\eta z}} \right)^2 - \frac{\partial S}{\partial z} \frac{1}{\eta} \left(\frac{e^\eta - 1}{He^{\eta z}} \right)^2 + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial S(T)}{\partial r} \right), \quad (9)$ <p>C – удельная теплоемкость материала покрытия; λ – коэффициент теплопроводности материала; ρ – плотность композиционного материала покрытия; T – точечная температура нагрева обрабатываемого материала; t – время нагрева при воздействии импульсом плазмы; R – радиус образца покрытия; H – толщина покрытия; r, z – цилиндрическая система координат (ось z перпендикулярна поверхности образца покрытия и совпадает с осью теплового потока компрессионной плазменной струи); $q_{\text{луч}}$ – плотность мощности лучистого потока зависит от степени черноты поверхности обрабатываемого покрытия ϵ и от постоянной Стефана-Больцмана σ_{SB} ($q_{\text{луч}} = \epsilon\sigma_{\text{SB}}T^4$)</p>

сом $L = 0,08$ м; длительность импульса $\tau_{\text{имп}} = 150$ мкс; энергия накопителя установки $W = 13,5$ кДж; толщина покрытия $H = 0,6 \cdot 10^{-3}$ м; радиус образца покрытия $R = 5 \cdot 10^{-3}$ м; количество импульсов $n = 1$; эффективные (интегральные) значения теплоемкостей $C_{\text{эф}}$, теплопроводностей $\lambda_{\text{эф}}$ и плотностей $\rho_{\text{эф}}$ композиционных материалов покрытий принимаются по рекомендациям [5] с использованием справочных данных [6–9] для отдельных фаз, составляющих композиции.

Согласно вычислительному эксперименту типичное распределение температуры по толщине обработанного поверхностного слоя на примере

покрытия, полученного плазменным распылением порошка ПР-Н70Х17С4Р4-3 + 32,4 % Ti + 7,6 % С, представлено на рис. 3.

В соответствии с рис. 3, толщина оплавленного поверхностного слоя покрытия составляет ~ 45 мкм. Об этом свидетельствуют расчетные кривые 4 и 5, из которых видно, что указанный слой нагревается до температуры, превышающей 3000 К. При данной температуре карбид титана (наиболее тугоплавкая фаза композиционного покрытия) находится в жидкофазном или близком к нему состоянии.

Таким образом, согласно расчетным данным, для покрытия, полученного плазменным распы-

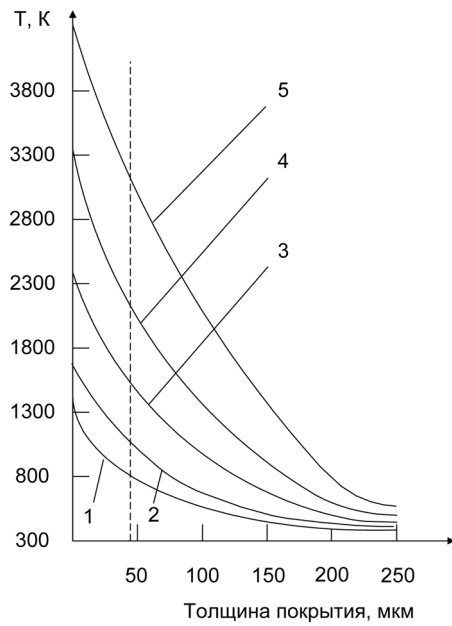


Рис. 3. Типичное распределение температуры по толщине обработанного поверхностного слоя при $r = 0$ мм: 1 – $t = 30$ мкс; 2 – 50; 3 – 80; 4 – 115; 5 – 150 мкс

лением порошка ПР – Н70Х17С4Р4 – 3 + 32,4 % Ti + 7,6 % С, при его модифицировании прогнозируются следующие процессы:

оплавленное или близкое к нему состояние слоя толщиной ~ 45 мкм при обработке единичным импульсом плазмы;

упрочнение тонкого оплавленного слоя при сверхбыстром охлаждении с модифицированием структуры (уплотнение материала, формирование нанокристаллических и аморфных фаз).

Прогнозируемое оплавление от единичного модифицирующего импульса позволяет с определенной точностью оценить суммарное количество импульсно-плазменных воздействий для полного послойного получения жидкофазного состояния по всей толщине покрытия. В табл. 4 приводится сопоставление теоретических и контрольных экспериментальных данных по сум-

марному количеству модифицирующих импульсов при обработке газотермических покрытий.

Как видно из табл. 4, экспериментальные данные превышают теоретические результаты на 7–14 %, что объясняется механизмом процессов, в соответствии с которым размеры зоны концентрации энергии от единичного импульса зависят от условий теплопередачи вглубь покрытия. Чем лучше условия теплопередачи, тем меньше зона концентрации энергии и толщина обработанного единичным импульсом слоя. Это имеет место при обработке граничных с подложкой слоев при сужении неоплавленной (пористой) зоны. Суммарное количество импульсов для полной обработки граничных слоев возрастает в сравнении с теоретическим результатом, который не учитывает упомянутый механизм процессов (толщина оплавленного слоя принимается постоянной величиной, рис. 3). Вместе с тем отличие теоретических и экспериментальных данных в пределах 7–14 % свидетельствует об адекватности оптимизации суммарного количества импульсов плазмы с применением математического моделирования.

С учетом результатов табл. 2, 4 изготовлены образцы (рис. 4) для изучения качества износостойких покрытий, которые нанесены на установленные оптимальных режимах.

Изучение свойств покрытий, полученных при оптимизированных технологических параметрах. Микроструктура газотермических покрытий, модифицированных воздействием серий импульсов компрессионной плазменной струи, представлена на рис. 5 и 6. Как видно, слои покрытий представляют собой оплавленный металлокерамический материал. Основными структурными элементами являются саморасплавляющийся сплав NiCrBSi и добавочные карбиды TiC серого оттенка. Наблюдается также пористость, которая, согласно рис. 2, находится

Таблица 4. Данные по суммарному количеству модифицирующих импульсов

Газотермическое покрытие	Толщина покрытия, мм	Теоретическое количество импульсов	Экспериментальное количество импульсов
Плазменное распыление порошка ПР-Н70Х17С4Р4-3 + 32,4 % Ti + 7,6 % С	~ 0,6	13	14
Плазменное распыление порошка ПР-Н70Х17С4Р4-3 + 40 % TiC	~ 0,6	13	15
Газопламенное распыление порошка ПР-Н70Х17С4Р4-3 + 32,4 % Ti + 7,6 % С	~ 0,6	12	14
Газопламенное распыление порошка ПР-Н70Х17С4Р4-3 + 40 % TiC	~ 0,6	12	13

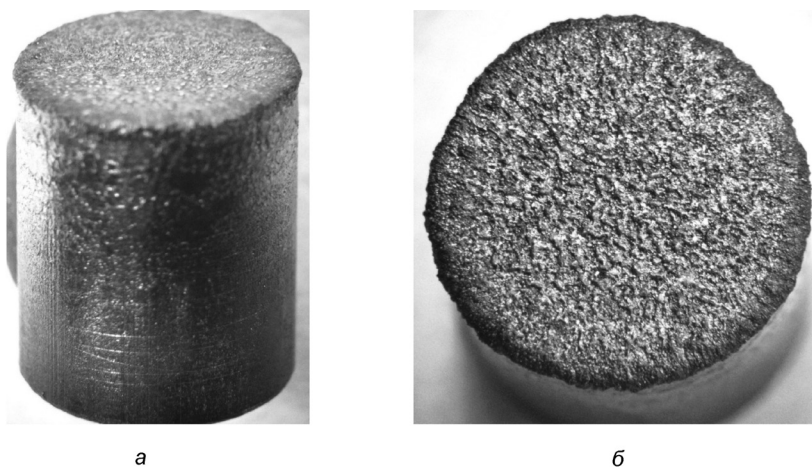


Рис. 4. Характерный внешний вид образцов: *а* – общий вид; *б* – покрытие

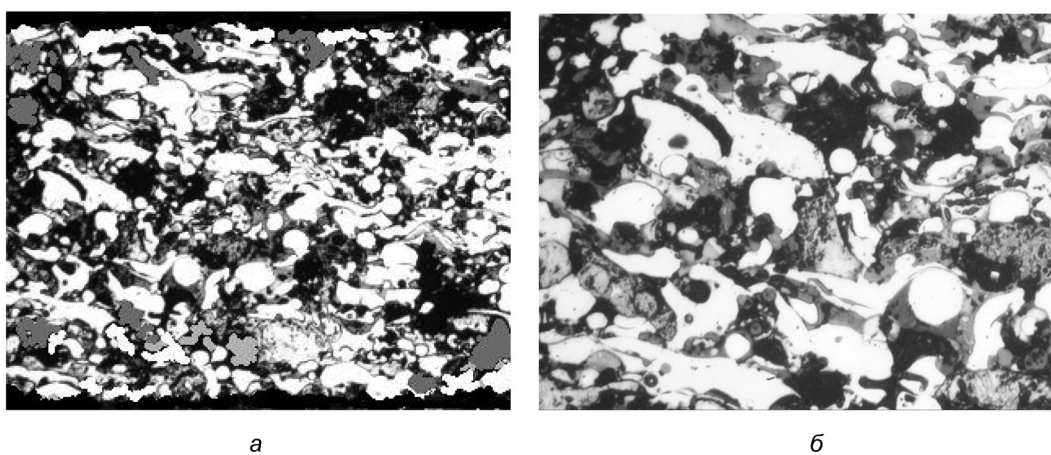


Рис. 5. Микроструктура покрытия после газотермического распыления порошка ПР-Н70Х17С4Р4-3 + 32,4 % Ti + 7,6 % С и обработки нанесенной композиции импульсами компрессионной плазменной струи: *а* – $\times 100$; *б* – $\times 200$

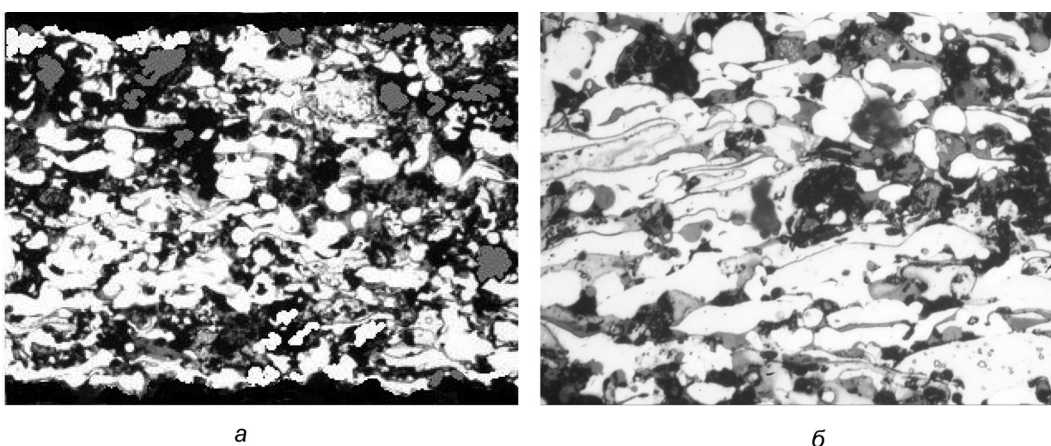


Рис. 6. Микроструктура покрытия после газотермического распыления порошка ПР – Н70Х17С4Р4 – 3 + 40 % TiC и обработки нанесенной композиции импульсами компрессионной плазменной струи: *а* – $\times 100$; *б* – $\times 200$

в пределах 4–5 %. Она аккумулирует смазку и стабилизирует смазочную пленку трибосопряжения. Равномерно распределенные карбиды титана существенно повышают твердость покрытий, снижают степень деформации их рабочей поверхности в паре трения. При этом снижается площадь фактического контакта трущихся поверхностей. В результате уменьшается вероятность непосредственного металлического контакта поверхностей трения, снижается интенсивность доминирующего изнашивания микроконтактным схватыванием.

С учетом вышеизложенного важным показателем качества износостойких покрытий является их микротвердость, которая характеризует распределение структурных элементов, определяющих механизм разрушения трибосопряжения. Сравнительные данные по усредненной микротвердости H при нагрузке на индентор 100 г для различных покрытий приведены на рис. 7. Согласно полученным данным, показатель H покрытий ПР – Н70Х17С4Р4 – 3 + 40 % TiC возрастает в сравнении с нанесением порошка ПР – Н70Х17С4Р4 – 3 + 32,4 % Ti + 7,6 % С незначительно. Это свидетельствует о том, что газотермическое распыление упомянутого порошка с импульсно-плазменной обработкой нанесенного материала позволяет осуществить карбидообразование по реакции $Ti + C \rightarrow TiC_x$ для получения ~ 40 % твердого тугоплавкого соединения в составе формируемого покрытия.

Принимая во внимание результаты на рис. 7 и предыдущего этапа исследований, необходимо отметить, что H распыленных покрытий до и после импульсно-плазменной обработки находится в пределах 6531–7653 и 8607–8915 МПа. Заметное увеличение микротвердости после обработки объясняется улучшением условий фор-

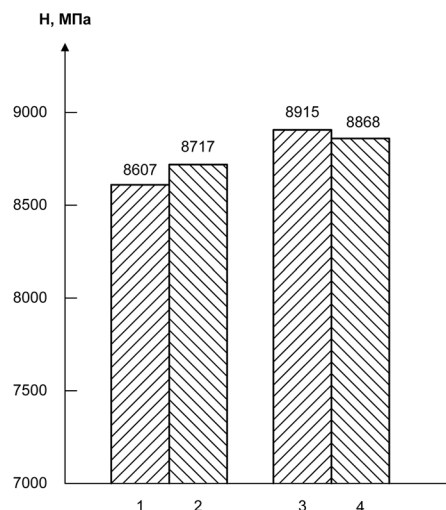


Рис. 7. Микротвердость покрытий: 1, 3 – после плазменного распыления порошков ПР-Н70Х17С4Р4-3 + 32,4 % Ti + 7,6 % С и ПР – Н70Х17С4Р4 – 3 + 40 % TiC с обработкой нанесенных композиций импульсами плазмы; 2, 4 – после газоплазменного распыления и обработки тех же материалов соответственно

мирования упрочненных нанокристаллических и аморфных фаз нанесенных композиций. В частности, возрастает степень импульсного локального оплавления композиционных материалов (в том числе тугоплавких составляющих), обеспечивается возможность сверхбыстрого охлаждения расплава. Наличие нанокристаллических и аморфных фаз подтверждается результатами исследования тонкой структуры с анализом области когерентного рассеяния (ОКР) рентгеновской съемки полученных покрытий (табл. 5).

Как видно из табл. 5, имеет место аморфизированное или близкое к нему нанокристаллическое строение основных элементов структуры газотермических покрытий, модифицированных импульсами плазмы при оптимальных режимах (об этом свидетельствуют размеры ми-

Таблица 5. Результаты исследования тонкой структуры полученных покрытий

Материал покрытия	Технология напыления	Элементы структуры покрытия после ИП	Размер ОКР $D_{эфф}$, нм
ПР-Н70Х17С4Р4-3 + 32,4 % Ti + 7,6 % С	Плазменная	Ni – solid solution	5,0 (\pm 0,3)
		TiC	36,3 (\pm 0,48)
ПР-Н70Х17С4Р4-3 + 32,4 % Ti + 7,6 % С	Газоплазменная	Ni – solid solution	5,2 (\pm 0,3)
		TiC	35,1 (\pm 0,57)
ПР-Н70Х17С4Р4-3 + 40 % TiC	Плазменная	Ni – solid solution	4,9 (\pm 0,3)
		TiC	25,4 (\pm 0,4)
ПР-Н70Х17С4Р4-3 + 40 % TiC	Газоплазменная	Ni – solid solution	5,1 (\pm 0,3)
		TiC	33,5 (\pm 0,57)

Примечание. ИП – импульсно-плазменная обработка газотермических покрытий.

кроксталлитов $D_{эфф}$). Для карбида титана характерно нанокристаллическое строение (увеличение размеров $D_{эфф}$), его аморфизация затруднена из-за высокой температуры плавления и проблематичности сверхбыстрого охлаждения TiC на подложке от жидкофазного состояния.

С учетом результатов предыдущего этапа исследований значения $D_{эфф}$ распыленных материалов до и после модифицирования импульсами плазмы находятся в пределах 5,0–47,9 и 4,9–36,3 нм. Наблюдается тенденция уменьшения размеров $D_{эфф}$ обработанных покрытий, что соответствует более высокому уровню аморфизации и измельчения зеренной структуры с возрастанием усредненной микротвердости модифицированных покрытий. Создаются дополнительные возможности возрастания износостойкости покрытий, являющихся объектом исследований.

Заключение. Исследованы процессы и оптимизированы технологические параметры обработки импульсами компрессионной плазменной струи газотермических покрытий на основе сплава NiCrBSi с твердыми тугоплавкими включениями TiC. Методика исследований базировалась на необходимости формирования упрочненных аморфных или близких к ним нанокристаллических структур. Показателями критерия оптимизации служили минимальная пористость и максимальная усредненная микротвердость покрытий. Установлено, что оптимальными являются следующие режимы импульсно-плазменных воздействий: начальное напряжение накопителя энергии установки 4,5 кВ; плотность энергии импульсных воздействий $5 \cdot 10^5$ Вт/см²; дистанция обработки 0,07–0,085 м; суммарное количество импульсов 13–15.

Суммарное количество импульсов должно обеспечить оплавление, уплотнение и упрочнение покрытий по всей толщине. Оптимизация этого режима с применением традиционного эксперимента относится к достаточно трудоемким исследованиям. В данном случае целесообразно применение математического моделирования процессов с уточнением теоретически установленного режима. Показано, что расчетная толщина оплавленного слоя покрытия составляет ~ 45 мкм. Прогнозируемое оплавление от единичного модифицирующего импульса по-

зволяет с определенной точностью оценить суммарное количество импульсно-плазменных воздействий для полного послойного получения жидкофазного состояния по всей толщине покрытия. Проверка адекватности оценки свидетельствует о том, что отличие экспериментальных и теоретических данных не превышает 7–14 %.

При изучении свойств полученных покрытий установлено, что структурообразование происходит в процессах кратковременного оплавления и сверхбыстрого охлаждения тонких слоев нанесенных материалов. В оплавленной металлокерамике основными структурными элементами являются самофлюсующийся сплав NiCrBSi и добавочные карбиды TiC. Наблюдается также пористость в пределах 4–5 %, которая аккумулирует смазку и стабилизирует смазочную пленку трибосопряжения. Равномерно распределенные карбиды титана существенно повышают твердость покрытий, снижают степень деформации их рабочей поверхности в паре трения. При этом снижается площадь фактического контакта трущихся поверхностей. В результате уменьшается вероятность непосредственного металлического контакта поверхностей трения, снижается интенсивность доминирующего изнашивания микроконтактным схватыванием.

Микротвердость распыленных покрытий до и после импульсно-плазменной обработки находится в пределах 6531–7653 и 8607–8915 МПа. Заметное увеличение микротвердости после обработки объясняется улучшением условий формирования упрочненных нанокристаллических и аморфных фаз нанесенных композиций. Наличие упомянутых фаз подтверждается результатами исследования тонкой структуры с анализом области когерентного рассеяния (ОКР) рентгеновской съемки полученных покрытий. Показано, что размеры микрокristаллитов $D_{эфф}$ распыленных материалов до и после модифицирования импульсами плазмы находятся в пределах 5,0–47,9 и 4,9–36,3 нм. Тенденция уменьшения $D_{эфф}$ после модифицирования соответствует более высокому уровню аморфизации и измельчения зеренной структуры с возрастанием усредненной микротвердости покрытий. Создаются дополнительные возможности возрастания износостойкости покрытий, являющихся объектом исследований.

Литература

1. **Витязь, П. А.** Основы нанесения износостойких, коррозионно-стойких и теплозащитных покрытий / П. А. Витязь, А. Ф. Ильюшенко, А. И. Шевцов. – Минск: Беларус. навука, 2006. – 363 с.
2. **Процессы** формирования газотермических покрытий и их моделирование / А. Ф. Ильюшенко [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 2011. – 357 с.
3. **К вопросу** оптимизации технологических параметров газотермического напыления защитных покрытий / А. Ф. Ильюшенко [и др.] // Порошковая металлургия: сб. науч. тр. / Нац. акад. наук Беларуси [и др.]; редкол.: П. А. Витязь (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2012. – Вып. 35. – С. 198–204.
4. **Ильюшенко, А. Ф.** Высокоэнергетическая обработка плазменных покрытий / А. Ф. Ильюшенко, В. А. Оковитый, А. И. Шевцов. – Минск: Белпринт, 2007. – 246 с.
5. **Моделирование** процесса импульсно-плазменной обработки защитных покрытий / А. Ф. Ильюшенко [и др.] // Порошковая металлургия: сб. науч. тр. / Нац. акад. наук Беларуси [и др.]; редкол.: П. А. Витязь (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2004. – Вып. 27. – С. 158–164.
6. **Газотермические** покрытия из порошковых материалов: справ. / Ю. С. Борисов [и др.]. – Киев: Наукова думка, 1987. – 544 с.
7. **Таблицы** физических величин: справ. / под ред. И. К. Кикоина. – М.: Наука, 1976. – 431 с.
8. **Дульнев, Г. Н.** Теплопроводность смесей и композиционных материалов: справ. / Г. Н. Дульнев, Ю. П. Заричняк. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с.
9. **Теплопроводность** твердых тел: справ. / А. С. Охотин [и др.]; под ред. А. С. Охотина. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 321 с.

RESEARCH OF THE PROCESSES AND OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF PULSE PLASMA TREATMENT OF THERMAL SPRAYED COATINGS BASED ON SELF-FLUXING ALLOY AND MODIFIED BY SOLID REFRACTORY COMPOUNDS

A. Ph. Ilyuschenko¹, A. I. Shevtsov¹, V. M. Astashinsky², A. M. Kuzmitski², L. V. Markova¹,
A. I. Letsko¹, K. V. Buikus³, T. A. Leonova¹, A. A. Kozorez³

¹*Powder Metallurgy Institute, Minsk, Belarus*

²*Luikov Heat and Mass Transfer Institute, Minsk, Belarus*

³*Belarusian national technical university, Minsk, Belarus*

The processes of treatment of thermal sprayed coatings based on alloy NiCrBSi with solid refractory inclusions TiC by pulses of compression plasma jet are researched and its technological parameters are optimized. The properties of the coatings obtained at optimized technological parameters are studied