

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МОДИФИКАЦИИ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ИМПУЛЬСНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКОЙ

*Канд. техн. наук ОКОВИТЫЙ В. А.,  
докт. техн. наук, проф., чл.-кор. НАН Беларуси ПАНТЕЛЕЕНКО Ф. И.,  
асп. ПАНТЕЛЕЕНКО А. Ф., студ. ОКОВИТЫЙ В. В., канд. техн. наук ШЕВЦОВ А. И.,  
доктора техн. наук, профессора ИЛЬЮЩЕНКО А. Ф., АСТАШИНСКИЙ В. М.*

*Белорусский национальный технический университет,  
ГНУ «Институт порошковой металлургии» НАН Беларуси,  
Институт физики имени Б. И. Степанова НАН Беларуси*

Повышение эффективности плазменных покрытий может быть достигнуто управлением свойств их локальных участков. При этом достигается возможность оптимального сочетания свойств различных участков покрытий, которое соответствует функциональному назначению нанесенных материалов. Как показывает отечественный и зарубежный опыт, такие градиентные покрытия находят достаточно широкое применение. Вместе с тем технология их получения имеет перспективы совершенствования

с улучшением свойств наносимых материалов обработкой высококонцентрированными потоками энергии. Например, послойная обработка напыленных износостойких материалов импульсами компрессионных плазменных потоков с различными уровнями энергии создает предпосылки получения структур с регулируемой пористостью, уменьшающейся от наружных слоев покрытий к подложке. Это позволит увеличить маслоудерживающую способность и износостойкость поверхностей трения в сочетании с повышенной когезионной и адгезионной прочностью граничных слоев. Для реализации перспектив упомянутой обработки необходимо изучить ее особенности и решить следующие основные задачи:

- оптимизировать режимы воздействия компрессионных плазменных потоков на слои плазменных покрытий;
- изучить свойства и механизм формирования структуры обработанных слоев покрытий;
- разработать схему процессов упрочнения и повышения износостойкости плазменных

композиционных покрытий при их послойной обработке импульсами компрессионных плазменных потоков с различными уровнями энергии.

**Разработка методики исследований.** Методика оптимизации импульсно-плазменной обработки базируется на необходимости получения упрочненных аморфных или близких к ним нанокристаллических структур покрытий, являющихся объектом исследований. При тепловом воздействии импульса плазменной струи происходит оплавление слоя покрытия толщиной около 30 мкм и его сверхбыстрое охлаждение с теплоотводом в подложку. Чем выше степень 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.

Ударно-волновое воздействие импульса вызывает пластическую деформацию и уплотнение обрабатываемого слоя покрытия. Согласно результатам [1] пластическое течение в кристаллах создает предпосылки образования структур диссипации (СД) с переупорядочением атомов и изменением их ближнего порядка, с переходом материала покрытия в состояние, подобное аморфному. Чем выше степень пластической деформации и уплотнения, тем больше вероятность формирования СД и аморфизации.

С учетом изложенного выше критерием оптимизации импульсно-плазменной обработки покрытий ( $\text{Ni80Cr20} + 12,5\% \text{ MoS}_2 + 55\% \text{ TiC}$ )

Ni, (FeCr30Mo3 + 7 % графит + 70 % TiC) Ni, (FeCr30 + 10 % графит + 70 % TiC) В выбрана максимальная степень их оплавления и уплотнения, что достигается увеличением энергетического уровня теплового и ударно-волнового воздействия импульса при уменьшении дистанции воздействия до минимального значения [2–4]. Вместе с тем уменьшение дистанции ограничивается появлением признаков разрушения покрытий (например, развиваются трещины).

Оценку степени оплавления и уплотнения, появления признаков разрушения проводят при исследовании шлифов поперечного сечения обработанных покрытий на металлографическом микроскопе MeF-3 фирмы Reichert (Австрия) и на полуавтоматическом анализаторе изображения (MOP-АМОЗ, AutoScan). Последний служит для получения обобщенной количественной информации о пористости обработанных покрытий и выкрошенных при подготовке шлифов частицах. Такая информация позволяет судить о степени оплавления и уплотнения напыленных материалов при воздействии на них импульсами плазменной струи.

При изучении свойств покрытий, полученных при оптимальных режимах, наряду с металлографическим анализом структуры образцов осуществляли измерение их микротвердости как важного показателя формирования аморфных или близких к ним нанокристаллических фаз повышенной прочности. Замеры микротвердости (ГОСТ 9450–76) выполняли в пяти поясах по длине поперечного сечения покрытия толщиной 0,5–0,6 мм. По результатам замеров определяли средние значения параметра. Применялся микротвердомер Micromet-II фирмы Buehler (Швейцария) с нагрузкой 100 г на индентор. Замеры, соответствующие переходной зоне от покрытия к подложке, не учитывались.

Импульсно-плазменную обработку напыленных покрытий проводили с помощью газоразрядного квазистационарного ускорителя типа магнитоплазменный компрессор (МПК). Преимуществом МПК по сравнению с другими типами ускорителей является высокая устойчивость генерируемого им компрессионного потока, возможность управления его составом,

размерами и параметрами плазмы при длительности разряда, достаточной для практических применений. Установка для получения компрессионных плазменных импульсов, генерируемых МПК компактной геометрии, состоит из вакуумного блока, включающего камеру с системами откачки и напуска рабочего газа, разрядного устройства ускорителя, емкостного накопителя энергии, а также диагностического комплекса.

МПК работал в режиме «остаточного газа», при котором предварительно откачанную вакуумную камеру МПК заполняли рабочим газом (азотом) до заданного давления (100–1300 Па). Азот одновременно служил для образования сложных соединений типа MeB/MeN (элементов структуры, повышающих твердость и износостойкость покрытий).

Амплитудное значение разрядного тока МПК изменялось от 70 до 100 кА при увеличении начального напряжения накопителя энергии с 3 до 5 кВ. Длительность разряда при этом составляла ~150 мкс. В указанных условиях на выходе разрядного устройства МПК формируется компрессионный плазменный поток диаметром 1 см и длиной 10 см (рис. 1). Плотность энергии импульсных воздействий составляла  $(2–3) \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>.

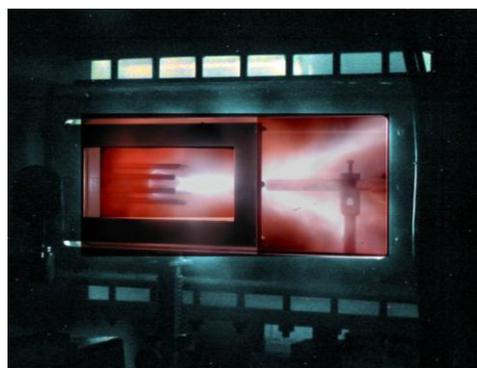


Рис. 1. Кинокадр свечения импульса плазменного потока

Плазменное напыление покрытий для последующей импульсно-плазменной обработки выполняли в воздушной атмосфере на установке УПУ-3Д с порошковым питателем TWIN-10. Режимы напыления оптимизированы на предыдущих этапах.

**Оптимизация импульсно-плазменной обработки газотермических покрытий из пла-**

кированных композиционных СВС-порошков. Согласно методическому подходу при варьировании технологических параметров импульсно-плазменной обработки изменяли дистанцию воздействий импульсами и их суммарное количество. Последний технологический параметр оказывает влияние на толщину обработанных слоев покрытия. Для износостойких покрытий, являющихся объектом исследований, необходимы повышенные когезионная и адгезионная прочности. Поэтому суммарное количество импульсов должно обеспечить оплавление и уплотнение покрытий по всей толщине.

**Экспериментальные цилиндрические образцы длиной 12 мм и диаметром 10 мм изготавливали по следующей технологии:**

- одну из торцевых поверхностей стальных образцов подвергали струйно-абразивной обработке зернами электрокорунда (давление сжатого воздуха – 0,4–0,6 МПа; угол атаки струи – 60–90 град.; расстояние от среза сопла пистолета до поверхности – 100–120 мм; расход абразива – 3–5 кг/ч; шероховатость подготовленной поверхности должна быть Ra = 12,5–25,0 мкм);

- на подготовленную поверхность плазменным напылением наносили покрытия (Ni80Cr20 + 12,5 % MoS<sub>2</sub> + 55 % TiC) Ni, (FeCr30Mo3 + 7 % графит + 70 % TiC) Ni, (FeCr30 + 10 % графит + 70 % TiC) В (ток дуги плазмотрона – 400–470 А; напряжение дуги – 68–95 В, расход плазмообразующего газа (аргона) – 50 л/мин; расход плазмообразующего газа (водорода) – 15 л/мин; дистанция напыления – 115–120 мм; расход распыляемого порошка – 3,0 кг/ч). Толщина покрытий составляла 0,5–0,6 мм;

- покрытия обрабатывали импульсами плазменной струи, полученными с помощью газоразрядного квазистационарного ускорителя типа магнитоплазменный компрессор (МПК). Дистанцию обработки и суммарное количество импульсов варьировали с их оптимизацией по принятым критериям. В табл. 1 представлены результаты оптимизации дистанции обработки.

Согласно данным табл. 1 оптимальные дистанции импульсно-плазменной обработки покрытий (Ni80Cr20 + 12,5 % MoS<sub>2</sub> + 55 % TiC) Ni, (FeCr30Mo3 + 7 % графит + 70 % TiC) Ni, (FeCr30 + 10 % графит + 70 % TiC) В находятся в пределах 0,07–0,08 м. Об этом свидетельст-

вует стабилизация пористости, желаемого уменьшения которой по критерию оптимизации при дистанциях ниже 0,07–0,08 м практически не происходит, что, очевидно, объясняется кратковременностью тепловых и динамических импульсных воздействий (~200 мкс), а также значительным содержанием в покрытиях тугоплавкой и твердой карбидной фазы (55–70 %), препятствующей возрастанию степени оплавления и уплотнения покрытий. Кроме того, при дистанциях ≤0,06 м наблюдается разрушение покрытий с развитием макротрещин.

Таблица 1

Результаты исследований по оптимизации дистанции обработки

Покрытие	Дистанция импульсно-плазменной обработки, м	Показатель пористости, %
(Ni80Cr20 + 12,5 % MoS <sub>2</sub> + 55 % TiC) Ni	0,09	3,4– 4,1
	0,08	2,6– 3,2
	0,07	2,4– 2,9
	0,06	
(FeCr30Mo3 + 7 % графит + 70 % TiC) Ni	0,09	4,0–4,6
	0,08	3,1–3,5
	0,07	2,8–3,4
	0,06	
(FeCr30 + 10 % графит + 70 % TiC) В	0,09	4,2–5,0
	0,08	3,6–4,3
	0,07	3,2–4,1
	0,06	

**Примечание.** При дистанциях обработки ≤0,06 м наблюдается развитие трещин в покрытиях.

Наряду с дистанцией обработки для формирования полностью оплавленных по всей толщине покрытий оптимизировали суммарное количество импульсов плазмы. Установлено, что необходимое и достаточное количество импульсов для полной обработки покрытий (Ni80Cr20 + 12,5 % MoS<sub>2</sub> + 55 % TiC) Ni, (FeCr30Mo3 + 7 % графит + 70 % TiC) Ni, (FeCr30 + 10 % графит + 70 % TiC) В составляет 13–14 воздействий. Дополнительные импульсы нецелесообразны, так как их многократное повторение ухудшает геометрию поверхности покрытия и усложняет его заключительную механическую обработку.

Согласно полученным результатам суммарное количество импульсов для исследуемых покрытий из плакированных порошков (13–14) меньше в сравнении с теми же порошками без

плакирующих оболочек (14–15). Это объясняется механизмом послойной импульсно-плазменной обработки, в соответствии с которым размеры зоны концентрации энергии от единичного импульса зависят от условий теплопередачи в глубь покрытия. Чем хуже условия теплопередачи, тем больше зона концентрации энергии и толщина обработанного единичным импульсом слоя. Это имеет место при обработке исследуемых покрытий из порошков, плакированных химическим никелированием и диффузионным борированием. Упомянутые плакирующие оболочки в структуре покрытий выполняют роль теплозащитных экранов, которые затрудняют передачу теплоты в нанесенных материалах. Низкая теплопроводность оболочек из никеля связана с тугоплавкими фазами оксидов никеля [5]. Теплоизоляционным материалом являются также пленки на частицах, полученные диффузионным борированием [6, 7]. С ухудшением теплопередачи и увеличением толщины обработанного единичным импульсом слоя суммарное количество импульсов для полной обработки покрытия уменьшается.

**Изучение свойств обработанных покрытий, полученных на оптимизированных режимах.** Микроструктура покрытий, полученных на оптимизированных режимах обработки, показана на рис. 2–4. Как видно, слои покрытий представляют собой оплавленный металлокерамический материал. Имеет место достаточно равномерное распределение структурных элементов. Это способствует увеличению износостойкости нанесенных композиций.

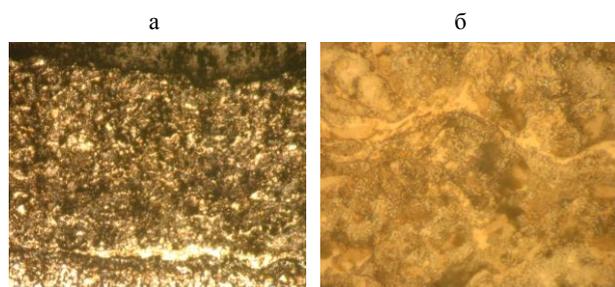


Рис. 2. Микроструктура покрытия (Ni80Cr20 + 12,5 % MoS<sub>2</sub> + 55 % TiC) Ni после импульсно-плазменной обработки: а –  $\times 100$ ; б –  $\times 500$

На фотографиях структуры заметны следы плакирования частиц, образующих покрытия. Указанный элемент структуры наблюдается в виде характерных непротравленных (свет-

лых) оболочек, охватывающих деформированные частицы. Сохранение плакирования после полета распыляемых композиционных частиц в плазменной струе, соударения их с подложкой и после воздействий на покрытия импульсами плазмы свидетельствует о том, что состав карбидной фазы и сложных соединений типа карбоборидов в исходных порошках и полученных покрытиях не претерпевает существенных изменений. Это важно для формирования необходимых эксплуатационных свойств нанесенных композиций, которые дополнительно улучшаются за счет технологического газа – азота, применяющегося при импульсно-плазменной обработке покрытий и способствующего образованию сложных соединений типа MeB/MeN (элементов структуры, повышающих твердость и износостойкость).

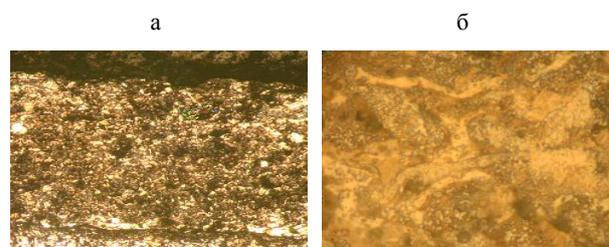


Рис. 3. Микроструктура покрытия (FeCr30Mo3 + 7 % графит + 70 % TiC) Ni после импульсно-плазменной обработки: а –  $\times 100$ ; б –  $\times 500$

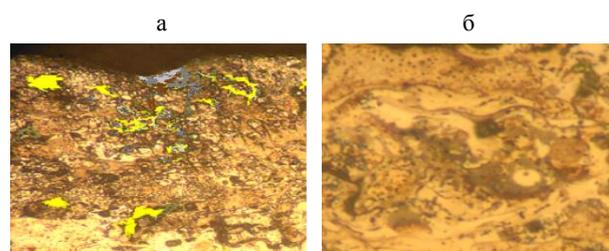


Рис. 4. Микроструктура покрытия (FeCr30 + 10 % графит + 70 % TiC) Ni после импульсно-плазменной обработки: а –  $\times 100$ ; б –  $\times 500$

К особенностям структуры нанесенных композиций относится усложнение травления ее элементов. Увеличение количества непротравленных участков свидетельствует о наличии упрочненных аморфных или близких к ним нанокристаллических структур с высокой коррозионной стойкостью, практически нерастворимых в кислотных травителях. Правомочность такой оценки подтверждается результатами ис-

следований, проведенных в Институте проблем материаловедения НАН Украины.

В соответствии с методическим подходом при изучении свойств покрытий анализировали изменение усредненной микротвердости нанесенных композиций. Согласно рис. 5 микротвердость напыленных материалов после применения импульсно-плазменной обработки возросла на 1087–1274 МПа, что объясняется более эффективным формированием фаз повышенной прочности с аморфной или близкой к ней нанокристаллической структурой. Эффективность обеспечивается локальным оплавлением и уплотнением слоев покрытий толщиной 30–40 мкм при их сверхбыстром охлаждении, а также отсутствием нежелательной рекристаллизации, что обусловлено развитием процессов импульсно-плазменной обработки в глубь покрытия (предыдущие уплотненные слои со сниженной пористостью и возросшей теплопроводностью не нагреваются до критических температур).

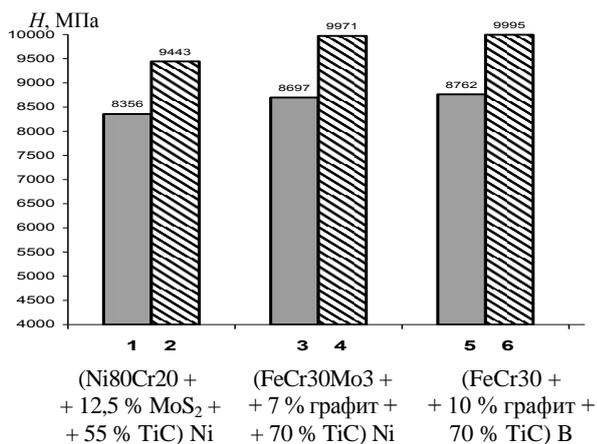


Рис. 5. Микротвердость покрытий из плакированных порошков: 1, 3, 5 – после плазменного напыления на режимах, оптимизированных на предыдущих этапах; 2, 4, 6 – после импульсно-плазменной обработки напыленных материалов

В сравнении с покрытиями из композиционных порошков без плакирования возрастание микротвердости  $\Delta H$  после импульсно-плазменной обработки ограничено. Согласно результатов предыдущих исследований, проведенных нами и представленных на рис. 6, для порошков FeCr30/FeCr30Mo3 + графит + TiC без плакирования значение  $\Delta H$  составляет 1285–1475 МПа. Как видно из рис. 5, это превышает возрастание микротвердости на 1233–1274 МПа для анало-

гичных порошков, композиционные частицы которых имеют оболочки Ni и V.

Ограничение  $\Delta H$  для покрытий из плакированных порошков объясняется тем, что плакирующие оболочки Ni и V выполняют роль теплозащитных экранов, которые затрудняют передачу теплоты в нанесенных материалах, удерживая ее в обрабатываемых импульсами плазмы слоях и в определенной степени уменьшая скорость охлаждения последних. Упрочнение за счет измельчения зеренной структуры до нанокристаллического уровня и получения аморфных фаз, а также возрастание микротвердости ограничиваются в сравнении с обрабатываемыми покрытиями без плакирования.

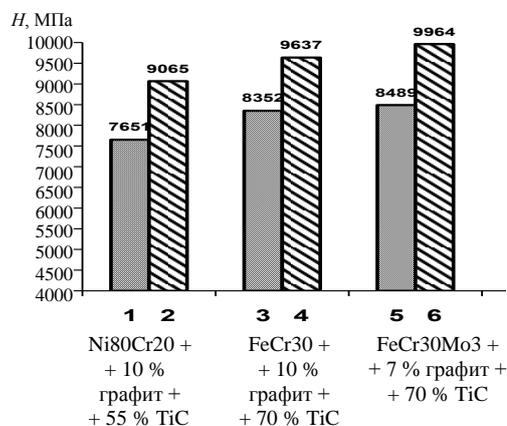


Рис. 6. Микротвердость покрытий без плакирования: 1, 3, 5 – после плазменного напыления; 2, 4, 6 – после импульсно-плазменной обработки напыленных материалов

Ограничение  $\Delta H$  компенсируется другими преимуществами покрытий из плакированных порошков. Например, при распылении указанных порошков на подложку в период полета композиционных частиц с оболочками Ni и V устраняется влияние окружающей среды на карбидную фазу и соединения типа MeV/MeC, которые в большей степени сохраняются в нанесенных покрытиях [8]. Поэтому абсолютные величины микротвердости нанесенных композиций после импульсно-плазменной обработки превышают значения  $H$  для аналогичных покрытий без плакирования (рис. 5, 6).

## ВЫВОД

Исследованы процессы и оптимизированы технологические параметры высокоэнергетической обработки плазменных покрытий из плакированных композиционных СВС-порошков. В качестве высокоэнергетической обра-

ботки рассматривались воздействия импульсами плазмы. В качестве материалов покрытий выбраны СВС-порошки ( $\text{Ni80Cr20} + 12,5\% \text{ MoS}_2 + 55\% \text{ TiC}$ ) Ni, ( $\text{FeCr30Mo3} + 7\% \text{ графит} + 70\% \text{ TiC}$ ) Ni, ( $\text{FeCr30} + 10\% \text{ графит} + 70\% \text{ TiC}$ ) В, композиционные частицы которых плакированы путем химического никелирования и диффузионного борирования.

Оптимизация технологических параметров выполнена при исследовании процессов структурообразования с оплавлением, уплотнением и высокоскоростным охлаждением покрытий. Согласно разработанной методике критерием оптимизации режимов служила максимальная степень локального оплавления и уплотнения напыленных композиций в отсутствие признаков разрушения покрытий от воздействий импульсами плазмы. Энергия воздействий генерировалась с применением газоразрядного квазистационарного ускорителя типа магнитоплазменный компрессор.

Установлено, что оптимальные дистанции импульсно-плазменной обработки покрытий находятся в пределах 0,07–0,08 м. Об этом свидетельствует стабилизация пористости, желаемого уменьшения которой по критерию оптимизации при дистанциях ниже 0,07–0,08 м практически не происходит. Кроме того, при дистанциях ниже 0,06 м наблюдается разрушение покрытий с развитием макротрещин. Установлено также, что необходимое и достаточное количество импульсов для полной обработки покрытий по всей толщине составляет 13–14 воздействий. Это меньше в сравнении с покрытиями из тех же порошков без плакирующих оболочек, что объясняется ухудшением условий теплопередачи, увеличением зоны концентрации энергии и толщины обработанного единичным импульсом слоя. Теплопередача ухудшается из-за плакирующих оболочек в структуре покрытий, выполняющих роль теплозащитных экранов.

При изучении свойств покрытий, обработанных на оптимальных режимах, выполнен металлографический анализ образцов, проанализировано изменение усредненной микротвердости нанесенных композиционных материалов. Установлено, что микроструктура покрытий представляет собой оплавленный металлокерамический материал. Имеет место достаточно равномерное распределение структурных элементов, что способствует увеличению износостойкости нанесенных композиций.

К особенностям структуры относится усложнение ее травления. Увеличение количества не протравленных участков свидетельствует о наличии упрочненных аморфных или близких к ним нанокристаллических фаз с высокой коррозионной стойкостью, практически нерастворимых в кислотных травителях.

При изучении свойств покрытий также показано, что значения усредненной микротвердости  $H$  напыленных материалов после применения импульсно-плазменной обработки возросли на 1087–1274 МПа за счет более эффективного формирования аморфных и нанокристаллических фаз. В сравнении с покрытиями из композиционных порошков без плакирования возрастание  $H$  ограничено. Вместе с тем это ограничение компенсируется другими преимуществами покрытий из плакированных порошков. Например, при распылении указанных порошков на подложку в период полета композиционных частиц с оболочками Ni и В устраняется влияние окружающей среды на карбидную фазу и соединения типа MeV/MeC, которые в большей степени сохраняются в покрытиях. В результате абсолютные величины микротвердости нанесенных композиций после импульсно-плазменной обработки превышают значения  $H$  для аналогичных покрытий без плакирования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Okovity, V. A. Researchs of the heating and movement peculiarities of the particles in the turbulent plasma streams at the formation of the wear coating with the solid lubricant insertion / V. A. Okovity // Manufacturing engineering. – Presov (Slovakia). – 2004. – Vol. 3, № 2. – P. 28–30.
2. Оковитый, В. А. Плазменные износостойкие покрытия с включением твердой смазки / В. А. Оковитый // Сварочное производство. – 2002. – № 6. – С. 41–43.
3. Okovity, V. Plasma wear-resistant coatings with inclusions of a solid lubricant / V. Okovity // J. Welding International. – 2003. – Vol. 16, № 11. – P. 918–920.
4. Исследование физических процессов, обуславливающих режимы работы КСПУ / В. М. Асташинский [и др.] // Физика плазмы. – Т. 18. – Вып. 1. – С. 90–98.
5. Ильющенко, А. Ф. Высокоэнергетическая обработка плазменных покрытий / А. Ф. Ильющенко, В. А. Оковитый, А. И. Шевцов. – Минск: Бестпринт, 2007. – 246 с.
6. Хасуи, А. Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Моригаки. – М.: Машиностроение, 1985. – 239 с.
7. Газотермические покрытия из порошковых материалов: справ. / Ю. С. Борисов [и др.]. – Киев: Наук. думка, 1987. – 544 с.
8. Ильющенко, А. Ф. Плазменные покрытия на основе керамических материалов / А. Ф. Ильющенко, В. А. Оковитый, А. И. Шевцов. – Минск: Бестпринт, 2006. – 316 с.

Поступила 02.02.2009