

УДК 621.791.9:519.81

Н.А. ДОЛГОВ  
 Інститут проблем прочності імені Г.С. Писаренка НАН України  
 І.В. СМІРНОВ  
 Національний технічний університет України «КПІ»  
 К.В. ЗАЙЧКО  
 Государственный научно-исследовательский институт  
 А.В. БЕСОВ  
 Інститут проблем матеріалознавства ім. І.Н. Францевича НАН України  
 Е.В. ВИХИРЕВА-ЦИНАРИДЗЕ  
 ООО «КБ Орловский»  
 А.Ю.АНДРЕЙЦЕВ  
 Государственный экономико-технологический университет транспорта

## ВЫБОР МАТЕРИАЛА ДЛЯ НАПЫЛЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

*Выбор материала для износостойкого плазменно-напыленного покрытия проведен методом принятия решений в условиях конфликтующих критериев. Исследованы механические свойства ряда покрытий, напыленных из порошков на основе  $Al_2O_3$  (в исходном состоянии и после плакирования двухслойными PVD тонкими пленками Ti и Al), а также самофлюсующихся сплавов с добавлением нанодispersного  $Al_2O_3$ . Для выбора покрытия применен метод весовых характеристик в комбинации с методом цифровой логики и предложенным усовершенствованным подходом к методам линейной и нелинейной нормализации данных. Сделан вывод, что наиболее эффективными являются покрытия, полученные из плакированного порошка ( $Al_2O_3/Ti/Al$ ).*

*Ключевые слова: теория принятия решений, выбор материала, метод нелинейной нормализации данных, плазменно-напыленное покрытие, плакированный порошок, нанодispersный порошок.*

М.А. ДОЛГОВ  
 Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України  
 І.В. СМІРНОВ  
 Національний технічний університет України «КПІ»  
 К.В. ЗАЙЧКО  
 Державний науково-дослідний інститут  
 О.В. ВИХИРЕВА-ЦИНАРИДЗЕ  
 ТОВ «КБ Орловський»  
 А.В. БЕСОВ  
 Інститут проблем матеріалознавства ім. І.Н. Францевича НАН України  
 А.Ю.АНДРЕЙЦЕВ  
 Державний економіко-технологічний університет транспорту

## ВИБІР МАТЕРІАЛУ ДЛЯ НАПИЛЕННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ

*Вибір порошку для плазмового напилення зносостійкого покриття проведено методом прийняття рішень в умовах конфліктних критеріїв. Досліджено механічні властивості ряду покриттів, які напилені з порошків на основі  $Al_2O_3$  (у початковому стані та після плакування двошаровими PVD тонкими плівками Ti та Al), а також самофлюсівних сплавів з додаванням нанодispersного  $Al_2O_3$ . Для вибору покриття застосовано метод вагових характеристик у комбінації з методом цифрової логіки та запропоновано вдосконалений підхід до методів лінійної та нелінійної нормалізації даних. Зроблено висновок, що найефективнішими є покриття, які отримані з плакованого порошка ( $Al_2O_3/Ti/Al$ ).*

*Ключові слова: теорія прийняття рішень, вибір матеріалу, метод нелінійної нормалізації даних, плазмово-напилення покриття, плакований порошок, нанодispersний порошок.*

N.A. DOLGOV  
 Pisarenko Institute for Problems of Strength, Nat. Ac. Sci. of Ukraine, Kiev, Ukraine  
 I.V. SMIRNOV  
 National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine  
 K.V. ZAYICHKO  
 State research institute, Kiev, Ukraine  
 O.V. VIKHIRIEVA-TSYNARIDZE  
 LTD "KB Orlovskiy", Kiev, Ukraine  
 A.V. BESOV  
 Frantsevich Institute for Problems of Materials Science, Nat. Ac. Sci. of Ukraine, Kiev, Ukraine  
 A.YU. ANDREYTSEV  
 State Economy and Technology University of Transport, Kiev, Ukraine

## SELECTION OF MATERIAL FOR THE PLASMA SPRAYING OF WEAR-RESISTANT COATINGS

*The selection of material for the wear-resistant plasma-sprayed coatings is carried out by decision-making under conflicting criteria. The mechanical properties of several coatings sprayed from powders based on  $Al_2O_3$  (in the initial state and after modification by the two-layer cladding with PVD of thin Ti and Al films), as well as from powders of self-fluxing alloys with the addition of nano- $Al_2O_3$ . A weight characteristics method in combination with the digital logic method and proposed is an improved approach for the linear and nonlinear data normalization methods were used for selection of coating. It was concluded that the most effective coating is obtained from a clad ( $Al_2O_3/Ti/Al$ ) powder.*

*Keywords: decision theory, material selection, non-linear data normalization method, plasma-sprayed coating, clad powder, nano powder.*

**Постановка проблемы**

Информационно-измерительные системы являются необходимым условием достижения высокого качества изделий, деталей, инструментов [1]. Важной и сложной частью технологического процесса по созданию износостойких деталей машин и механизмов является выбор наилучшего материала для нанесения покрытий. Выбор наиболее эффективного материала покрытия является важной научно-практической задачей при проведении исследований, которая должна решаться системным и наиболее рациональным подходом. Неверный выбор материала покрытия может привести не только к нежелательным последствиям, но и значительным материальным потерям.

Повышение характеристик прочности и трибологических свойств плазменно-напыленных покрытий возможно путем использования модификаторов, которые вводятся в покрытие вместе с порошком [2, 3]. Функции модификаторов обычно выполняют ультрадисперсные составляющие, которые обеспечивают создание в покрытии определенного структурного состояния, характерного твердым и износостойким материалам. При этом могут использоваться химические соединения простых оксидов типа  $Me_2O_3$  ( $Me - Al, Cr$ ),  $MeO_2$  ( $Me - Ti, Zr, Si$ ), а также чистые металлы, которые имеют высокую химическую активность. Модифицировать порошки целесообразно конгломерацией при помощи механохимического синтеза или плакированием частиц порошка методами физического осаждения в вакууме (PVD).

**Анализ последних исследований и публикаций**

Износостойкие покрытия широко используются в различных отраслях машиностроения. Технология плазменного напыления износостойких керамических покрытий занимает средний ценовой сегмент относительной себестоимости по сравнению с другими технологиями нанесения износостойких покрытий. В настоящее время отсутствуют исследования, связанные с анализом и применением методов принятия решений для выбора плазменно-напыленных покрытий. В то же время используется большое количество методов выбора материалов для различных элементов конструкций. Известные многокритериальные методы выбора материалов могут быть адаптированы и для выбора плазменно-напыленных покрытий. Для покрытий может быть использован также метод весовых характеристик в комбинации с методом нелинейной нормализации данных и модифицированным методом цифровой логики [4].

Плакирование частиц порошка PVD методами является перспективным направлением получения композиционных порошков. Ряд результатов по нанесению методом магнетронного распыления наноструктурных пленок из меди, титана и платины на порошок приведен в работе [5]. Хотя качество полученных порошков достаточно высоко, однако этот метод имеет относительно низкую скорость осаждения пленок, что значительно увеличивает время плакирования. Поэтому более эффективно использовать метод вакуумно-дугового испарения для получения тонких качественных пленок на керамических порошках.

За последнее время появилось большое количество работ, которые рассматривают вопросы модифицирования порошков для напыления наночастицами. Обработке порошков механохимическим синтезом посвящены работы [2, 3]. Так, например, при помощи высокоэнергетической планетарной шаровой мельницы получен наноконпозиционный порошок  $Al-Al_2O_3$  с размером частиц оксида алюминия 20 – 40 нм, что обеспечило повышения твердости и износостойкости напыленных покрытий [2]. В работе [3] рассматривается возможность поиска эффективных модификаторов для получения композиционных покрытий с антифрикционными свойствами. После анализа ультрадисперсных оксидов со структурой корунда и рутила, углерода и нитрида бора, металлов со структурами типа вольфрама и магния делается вывод об эффективности применения в качестве модификатора оксида алюминия. В работе [6] показано применение в качестве модификатора нанопорошка оксида алюминия, который вводится в плазменное покрытие на основе порошков ПГ-19М-01 и ПС-12НВК-01. На основании исследований сделан вывод, что добавление нанопорошка оксида алюминия приводит к дроблению структурных составляющих в плазменно-напыленных покрытиях, снижению остаточных напряжений и плотности дислокаций, а также повышению износостойкости покрытий.

### Формулирование цели исследования

Подбор, адаптация и обоснование применения многокритериального метода принятия решений для выбора наилучшего износостойкого покрытия.

### Материалы и оборудование

Для напыления покрытий использовали порошок  $Al_2O_3$  с фракций 40–63 мкм в исходном состоянии и после плакирования двухслойными пленками (Ti/Al) вакуумно-дуговым методом, а также композиционный самофлюсирующий порошок ПГ-CP2 (NiCrFeBSi) с добавлением в количестве 0,5–1% нанодисперсного порошка  $Al_2O_3$  фракцией 40–50 нм.

Пленки на частицах порошка  $Al_2O_3$  состояли из двух слоев: подслоя из Ti толщиной 70–160 нм и внешнего слоя из Al толщиной 2–3 мкм. Далее по тексту плакированный порошок обозначается как  $Al_2O_3/Ti/Al$ . Плакирование осуществляли на вакуумно-дуговой установке, которая оборудована специально разработанным вибрационным приспособлением для перемешивания порошка [7]. Оборудование и технологические процессы, которые происходят во время плакирования порошков вакуумно-дуговым методом, более подробно описаны в работе [8].

Приготовление гомогенной смеси порошка ПГ-CP2 с нанопорошком  $Al_2O_3$  осуществляли механохимической обработкой в планетарной шаровой мельнице XQM-2 с дополнительным вакуумированием рабочих емкостей. Применение такой обработки способствовало образованию прочных связей между микро- и наночастицами порошковой смеси, что обеспечивало перенос наночастиц в покрытие при последующем плазменном напылении.

Порошки напыляли плазмотроном с частично вынесенной дугой и дополнительным обдувом плазменной струи концентрическим потоком защитного газа. Ток дуги выбирали в пределах 80–90 А, напряжение – 50–60 В, расход плазмообразующего и защитного газа (аргона) составлял 2–3 л/мин при диаметре сопла 2 мм. Благодаря таким конструктивным особенностям и технологическим режимам, характер течения плазменной струи был близок к ламинарному, что также обеспечило благоприятные условия для сохранения и переноса в покрытие плакирующих металлических пленок, так и наночастиц. Покрытие толщиной 200–300 мкм напыляли на плоские образцы  $5 \times 10 \times 20$  мм<sup>3</sup> из стали Ст.3.

### Экспериментальные исследования

Выбор материалов для нанесения покрытий осуществлялся исходя из критериев:

- износостойкости,
- прочности сцепления,
- микротвердости,
- остаточных напряжений.

Для исследования прочности сцепления использовали метод нормального отрыва согласно ГОСТ 9.304-87. Микротвердость определяли путем вдавливания алмазной пирамидки Виккерса при нагрузке 0,98 Н на приборе ПМТ-3. Процесс износа покрытий исследовали в условиях сухого трения на машине СМЦ-2 по схеме ролик (закаленная сталь У8) – плоский образец с покрытием. Скорость вращения ролика составила 330 мин<sup>-1</sup> с приложенной нагрузкой 55 Н. При определении относительной износостойкости покрытий из плакированных порошков в качестве эталона принимали покрытие из чистого  $Al_2O_3$ , а для покрытий, модифицированных нанопорошком, – материал основы. Для исследования остаточных напряжений использовали образцы размером 0,2×9×85 мм<sup>3</sup> из низкоуглеродистой стали, которые подвергали абразивно-струйной обработке с двух сторон и жестко крепили на плоской поверхности для обеспечения невозможности деформирования во время процесса напыления. Остаточные напряжения определяли по изменению радиуса кривизны образца после напыления [9]. Модуль упругости плазменно-напыленных покрытий определяли после испытаний плоских образцов на растяжение по методике, которая приведена в работе [10]. Результаты испытаний приведены в табл. 1.

Таблица 1

### Механические характеристики плазменно-напыленных покрытий

Варианты покрытий	Материал покрытия	Прочность сцепления, МПа	Остаточные напряжения, МПа	Микротвердость, ГПа	Относительная износостойкость
1	$Al_2O_3$	16	-26	9,7	1
2	$Al_2O_3/Ti/Al$	37	-17	11,3	6,3
3	NiCrFeBSi	53	83	3,1	2,1
4	NiCrFeBSi+ $Al_2O_3$	58	67	4,3	3,9

### Методика выбора материала износостойких покрытий

Для выбора материалов использовали известные методы принятия решений. Определение производственных требований является первым шагом в процессе выбора. Основным требованием, которое предъявляется к покрытиям, является износостойкость. В процессе выбора покрытий использовали полученные значения механических характеристик (см. табл. 1). Бенефициарными являются такие характеристики как относительная износостойкость, микротвердость и прочность сцепления,

соответственно небенефициарными – остаточные напряжения. Так как характеристики заданы в числовой форме, то использовали метод для выбора материалов, который основан на определении весовых характеристик [4].

*Метод весовых характеристик.* Метод позволяет ранжировать материалы покрытий на основе показателей эффективности. Индекс эффективности  $\gamma$  определяется по формуле:

$$\gamma = \sum_{i=1}^n Y_i \alpha_i \quad (1),$$

где  $Y$  – нормированное значение характеристики  $i$ -го покрытия;  $\alpha$  – весовой коэффициент,  $n$  – общее количество вариантов покрытий.

Наилучшим является покрытие с наибольшим индексом эффективности. Для сравнения важности характеристик определяют весовой коэффициент  $\alpha$  с помощью методов цифровой логики. При сравнении характеристик с различными единицами измерения проводят нормирование, которое может быть как линейным, так и нелинейным.

*Метод цифровой логики.* Эксперты определяют важность характеристик с учетом всех возможных сочетаний, сравнивая их попарно. Наиболее важной характеристике присваивается значение «1», наименее важной – «0». Общее число возможных решений  $N$  определяется по формуле:  $N=n(n-1)/2$ , где  $n$  – число характеристик, которые сравнивают. Весовой коэффициент  $\alpha$  для каждой характеристики определяется путем отношения количества положительных решений к общему количеству возможных решений  $N$ . Сумма всех весовых коэффициентов равна единице ( $\sum \alpha = 1$ ). Весовой коэффициент  $\alpha$  определяется по формуле:

$$\alpha = N_{\text{полож.}} / N, \quad (2)$$

где  $N_{\text{полож.}}$  – количество положительных решений.

*Метод линейного нормирования.* Нормируем значения характеристик так, чтобы максимальное значение не превышало величины 100. Для бенефициарных характеристик – это отношение величины характеристики  $X$  к максимальному значению  $X_{\text{max}}$  данной характеристики, умноженное на 100:

$$Y = (X / X_{\text{max}}) \cdot 100 \quad (3)$$

Для небенефициарной характеристики – это отношение минимального значения характеристики,  $X_{\text{min}}$  к текущему значению данной характеристики, умноженное на 100:

$$Y = (X_{\text{min}} / X) \cdot 100 \quad (4)$$

*Метод модифицированной цифровой логики.* Недостатком метода цифровой логики является то, что наименее важной характеристике присваивается значение «0». Следовательно, ее весовой коэффициент будет равен нулю. Поэтому эта характеристика исключается из процесса выбора материала покрытия. В модифицированном методе предлагается присваивать значения «1» для наименее важной характеристики, «3» – для наиболее важной характеристики и «2» – в случае, когда характеристики одинаково важны. По сравнению с методом цифровой логики отличием в методике расчета будет определение количества возможных решений:

$$N = 2n(n-1).$$

*Метод нелинейной нормализации.* Данный метод использует нелинейную функцию при преобразовании значений бенефициарных и небенефициарных характеристик соответственно:

$$Y = a_1 \ln(b_1 X + c_1), \quad (5)$$

$$Y = a_2 \ln(b_2 / X + c_2), \quad (6)$$

где  $a_1, a_2, b_1, b_2, c_1$  и  $c_2$  – константы.

Для нелинейной нормализации необходимо определить указанные выше константы. При расчетах по формуле (5) необходимо учитывать следующие ограничения: 1)  $Y = -100$  (при  $X = 0$ ); 2)  $Y = +100$  (при  $X = X_{\text{max}}$ ). Параметр критического значения рассматриваемой характеристики  $X_{\text{к}}$  позволяет эксперту присвоить граничное значение, ниже которого нормируемая величина  $Y$  становится отрицательной и индекс эффективности  $\gamma$  снижается. Третье ограничение имеет вид  $Y = 0$  (при  $X = X_{\text{к}}$ ). Выполнение этих трех условий позволяет вычислить константы:

$$a_1 = -100 / \ln(X_{\text{к}} / (X_{\text{max}} - X_{\text{к}})); b_1 = (X_{\text{max}} - 2X_{\text{к}}) / (X_{\text{к}}(X_{\text{max}} - X_{\text{к}})); c_1 = X_{\text{к}} / (X_{\text{max}} - X_{\text{к}}). \quad (7)$$

В соответствии с (7) функция нормирования характеристики является неопределенной при  $X = X_{\text{max}}/2$ . С учетом данного условия функция имеет вид:  $Y = (200X/X_{\text{max}}) - 100$ . Окончательно, для этого случая:

$$\begin{cases} Y = a_1 \ln(b_1 X + c_1) \text{ при } X_k \neq X_{\max} / 2 \\ Y = (200X / X_{\max}) - 100 \text{ при } X_k = X_{\max} / 2 \end{cases} \quad (8)$$

Аналогичный подход можно применить и для небенифициарных характеристик. В случае имеем ограничения: 1)  $Y = +100$  (при  $X = X_{\min}$ ); 2)  $Y = -100$  (при  $X \rightarrow \infty$ ). Критической величиной для характеристики является значение  $X = X_k$  (при  $Y = 0$ ). Необходимые константы рассчитываются по следующим формулам:

$$a_2 = -100 / \ln(-X_k / (X_{\min} - X_k)); b_2 = (-X_k^2 + 2X_{\min} X_k) / (X_{\min} - X_k); c_2 = -X_{\min} / (X_{\min} - X_k). \quad (9)$$

Подобно предыдущему случаю такую же процедуру следует выполнить для определения формы нормирующей функции при  $X = 2X_{\min}$ . С учетом данного условия функция имеет вид:  $Y = (200X_{\min} / X_{\max}) - 100$ . Окончательно для этого случая:

$$\begin{cases} Y = a_2 \ln(\frac{b_2}{X} + c_2) \text{ при } X_k \neq 2X_{\min} \\ Y = \frac{200X_{\min}}{X_{\max}} - 100 \text{ при } X_k = 2X_{\min} \end{cases} \quad (10)$$

Экспертами были определены критические значения  $X_k$  характеристик покрытий (см. табл. 2).

Таблица 2

**Критические значения характеристик покрытий  $X_k$  для улучшенного метода нелинейной нормализации**

Критическое значение характеристики	Прочность сцепления, МПа	Остаточные напряжения*, МПа	Микротвердость, ГПа	Относительная износостойкость
$X_k$	20	86	3,0	1,5

\* с учетом пропорционального линейного преобразования значений в положительную область.

*Усовершенствование методов линейной и нелинейной нормализации характеристик.* Величина остаточных напряжений в исследуемых покрытиях варьируется от отрицательных (-17 МПа) до положительных значений (83 МПа) (см. табл. 1). В таком виде применение любого из рассмотренных выше методов нормализации будет ошибочно. Поэтому необходимо усовершенствование обоих методов для корректной нормализации характеристики. Проведем пропорциональное линейное преобразование данных в область положительных значений, при этом отсчет  $X_{\min}$  начнем со значения 10. Подобному преобразованию подлежат и определенные ранее экспертами критические значения  $X_k$  для остаточных напряжений (см. табл. 3)).

Таблица 3

**Значения остаточных напряжений для проведения расчетов улучшенными методами линейной и нелинейной нормализации**

Исходные значения остаточных напряжений	-26	-17	83	67
Преобразованные значения остаточных напряжений $X$	10	19	119	103

*Сравнение характеристик покрытий.* Применим описанные выше методы для сравнения характеристик покрытий. Результаты использования метода цифровой логики и весовой коэффициент  $\alpha$ , который рассчитан по формуле (2), представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Определение весовых коэффициентов характеристик покрытий (метод цифровой логики)**

Характеристика	Количество возможных решений $N=n(n-1)/2$						$N_{\text{полож.}}$	Весовой коэффициент $\alpha$
	1	2	3	4	5	6		
1 Относительная износостойкость	1	1	1				3	1/2
2 Микротвердость	0			1	1		2	1/3
3 Прочность сцепления		0		0		1	1	1/6
4 Остаточные напряжения			0		0	0	0	0

Результаты применения улучшенного метода линейной нормализации с использованием формул (4), (5) и расчет индекса эффективности  $\gamma$  по формуле (1) приведены в табл. 5. Для нормализации значений остаточных напряжений использовали данные из табл. 5. Результаты применения модифицированной цифровой логики с привлечением экспертов представлены в табл. 6. Также в этой таблице приведены результаты расчета весового коэффициента  $\alpha$  по формуле (2).

В соответствии с улучшенным методом нелинейной нормализации рассчитаны константы  $a_1, a_2, b_1, b_2, c_1$  и  $c_2$ , по формулам (7) и (9). Проведена нелинейная нормализация характеристик покрытий  $Y$  по формулам (8) и (10), с использованием преобразованных данных из табл. 3 и критических значений  $X_k$  из табл. 2. Также по формуле (1) рассчитан индекс эффективности  $\gamma$ . Результаты расчетов приведены в табл. 7.

Таблица 5

Результаты расчета параметров  $Y$  линейной нормализации и индекса эффективности  $\gamma$ 

Покрытие	Относительная износостойкость	Микротвердость	Прочность сцепления	Остаточные напряжения	Индекс эффективности $\gamma$
1	15,87	85,84	27,59	100	50,34
2	100	100	63,79	11,1	93,97
3	33,33	27,43	91,38	1,0	41,04
4	61,9	38,05	100	0,92	60,3

Таблица 6

Определение весовых коэффициентов характеристик покрытий (метод модифицированной цифровой логики)

Характеристика		Колич. возможных решений $N = 2n(n-1)$						$N_{\text{полож.}}$	Весовой коэф. $\alpha$
		1	2	3	4	5	6		
1	Относительная износостойкость	3	3	3				9	0,375
2	Микротвердость	1			1	3		5	0,208
3	Прочность сцепления		1		3		3	7	0,292
4	Остаточные напряжения			1		1	1	3	0,125

Таблица 7

Параметры  $Y$  нелинейной нормализации и индекса эффективности  $\gamma$ 

Покрытия	Относительная износостойкость	Микротвердость	Прочность сцепления	Остаточные напряжения	Индекс эффективности $\gamma$
1	-96,29	25,4	-4,52	12,51	-53,87
2	29,16	29,16	63,72	8,64	130,68
3	6,09	0,60	26,24	-1,69	30,95
4	18,6	7,0	29,16	-0,95	53,81

### Выводы

Особенности задачи по выбору материала покрытия, показывают необходимость применения методов многокритериальной оптимизации. Из рассмотренных вариантов покрытий взаимную конкуренцию друг другу могут составить только два варианта: №2 ( $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}/\text{Al}$ ) и №4 ( $\text{NiCrFeBSi} + \text{Al}_2\text{O}_3$ ). Анализ значений индекса эффективности позволяет сделать вывод, что плазменно-напыленное покрытие из плакированного порошка ( $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}/\text{Al}$ ) обладает лучшими характеристиками. В то же время наименее эффективным в соответствии с улучшенным методом нелинейной нормализации является керамическое покрытие из оксида алюминия. Указанный метод имеет ряд преимуществ, в т. ч. большую градацию распределения значений индекса эффективности в связи с использованием критических значений характеристик покрытий  $X_k$ , которые были определены экспертами.

Существующие методы принятия решений могут быть адаптированы и улучшены для использования при выборе материалов износостойких покрытий. Метод весовых характеристик в комбинации с улучшенным методом нелинейной нормализации данных и модифицированным методом цифровой логики для характеристик покрытий является оптимальным и системным подходом.

### Список использованной литературы

1. Хімичева Г.І. Інформаційні та вимірювальні системи: теорія і практика. Посібник / Г.І.Хімичева, О.В.Іванченко, М.А.Долгов, А.С.Зенкін. – К.: Основа, 2006. – 448 с.
2. Борисов Ю.С. Получение порошков для газотермических покрытий методами механического легирования и механохимического синтеза / Ю.С. Борисов, А.Л. Борисова, Л.И. Адеева и др. // Сварочное производство. – 2010. – № 12. – С. 18 – 22.
3. Mazaheri Y. Development of Al356–Al2O3 nanocomposite coatings by high velocity oxy-fuel technique/ Y. Mazaheri, F. Karimzadeh, M.H. Enayati // J. Mater. Sci. Technol. – 2013. – V. 29, No 9. – P. 813 – 820.
4. Dehghan-Manshadi B. A novel method for materials selection in mechanical design: Combination of non-linear normalization and a modified digital logic method / B. Dehghan-Manshadi, H. Mahmudi, A. Abedian, R. Mahmudi // Materials and Design. – V. 28. – 2007. – P. 8 – 15.

5. Schmid G.H.S. A method for uniformly coating powdery substrates by magnetron sputtering / G.H.S. Schmid, C. Eisenmenger-Sittner // *Surface and Coatings Technology*. – 2013. – V. 236. – P. 353 – 360.
6. Князьков К.В. Повышение свойств плазменно-порошковых покрытий модифицированием наноразмерными частицами / К.В. Князьков, М.В. Радченко, А.Н. Смирнов и др. // *Ползуновский вестник*. – 2012. – № 1/1. – С. 127 – 130.
7. Пат. № 89851 України, МПК (2014) B22F1/00 Пристрій для плакування порошків у вакуумі / Смирнов І.В., Селіверстов І.А., Чорний А.В., Ковальчук В.Ю.; заявл. 31.12.2013; опубл. 25.04.2014, Бюл. №8.
8. Копилов В.І. Процеси іонно-плазмового плакування порошків для газотермічних покриттів / В.І. Копилов, І.В. Смирнов, І.А. Селіверстов // *Наукові вісті НТУУ „КПІ”*. – 2009. – № 3. – С. 11 – 20.
9. Dong S. Study on the mechanism of adhesion improvement using dry-ice blasting for plasma-sprayed Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings/ S. Dong, B. Song, B. Hansz, H. Liao, C. Coddet // *Journal of Thermal Spray Technology*. – V. 22(2-3). – 2013. – P. 213 – 220.
10. Dolgov N.A. Method for determining the modulus of elasticity for gas thermal spray coatings / N.A. Dolgov // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. – 2004. – V. 43, No. 7 – 8. – P. 423 – 428.