

УДК 621.762.4.001

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРИСТЫХ НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД

© 2014 г. **Н. А. Шестаков, В. Н. Субич, А. В. Власов**

Московский государственный индустриальный университет» (МГИУ)

Статья поступила в редакцию 15.10.13 г., доработана 06.12.13 г., подписана в печать 20.12.13 г.

**Н. А. Шестаков** – докт. техн. наук, проф., декан автомобильного факультета МГИУ (115280, г. Москва, ул. Автозаводская, 16, каб. 1413). Тел.: (495) 675-62-18, (495) 674-63-85. E-mail: shes-v@mail.msiu.ru.

**В. Н. Субич** – докт. техн. наук, проф., зав кафедрой «Машины и технология обработки металлов давлением» МГИУ. E-mail: vnsu@rambler.ru.

**А. В. Власов** – докт. техн. наук, профессор той же кафедры. E-mail: avv@qform3d.com.

Излагается методика проведения виртуальных экспериментальных работ по оценке основных материальных функций, определяющих пластическое течение пористых материалов: функций плотности эллипсоидальной поверхности нагружения и зависимости напряжения текучести от деформации. Методика основана на создании конечно-элементной модели представительного объема (материальной точки) пористого тела со случайно распределенными пустыми элементами, имитирующими свойства пор, и апробирована путем проведения физических и виртуальных экспериментальных работ. Полученные данные сопоставления результатов физических и виртуальных экспериментов дают основание рекомендовать новую методику взамен экспериментальных исследований механических свойств пористых материалов.

**Ключевые слова:** обработка материалов давлением, порошковая металлургия, сжимаемые материалы, теория пластичности, механические свойства, моделирование.

There was discoursed procedure of carrying out of virtual experimental works on assessment of the main material functions, that defining plastic current of porous materials: function of density of ellipsoidal surface of loading and dependence of yield stress on deformation. The procedure is based on creation of finite element model of representative volume (a material point) of porous body with casually distributed empty finite elements that imitated properties of porous, and was approved by means of carrying out of physical and virtual experiments. Obtained data of comparison of experimental findings give ground to recommend the new procedure instead of experimental studies of mechanical properties of porous materials.

**Key words:** metal-forming process, powder metallurgy, squeezed materials, plasticity theory, mechanical properties, modeling.

### ВВЕДЕНИЕ

Порошковая металлургия открывает ряд новых возможностей экономичного производства деталей машиностроения, создания новых материалов, формирования требуемого структурного состояния и получения многих других преимуществ по сравнению с традиционными способами обработки металлических и неметаллических материалов [1]. Однако технология, включающая в себя прессование заготовок (брикетов) из металлических порошков в закрытом контейнере и последующее спекание, как правило, не обеспечивает высокого уровня механических характеристик конечной продукции [2].

Существенное повышение свойств изделий из металлических порошков стало возможным, когда начали применять спеченные заготовки для процессов обработки металлов давлением (ОМД) с развитым пластическим течением. В этом случае появляется возможность управле-

ния в широких пределах параметрами интенсификации процессов уплотнения и консолидации (залечиваемости дефектного строения, обусловленного наличием пор), ускорения межчастичного диффузионного массопереноса, а также формирования мелкозернистой структуры вплоть до наноструктурированного состояния. К основным характеристикам развитого пластического течения, открывающим возможность формирования свойств изделий за счет перечисленных эффектов, относятся: степень деформации, схема напряженного состояния, температурно-скоростные условия деформации, вид траектории деформации. Наблюдение, управление и предсказание количественных значений указанных параметров осуществляется на основе решения соответствующих задач, очерченных рамками теории пластичности необратимо сжимаемой сплошной среды.

В настоящее время, в связи с тем, что многие кинематические аспекты поведения сплошных

и спеченных порошковых тел схожи, общепризнаны континуальные представления о процессах пластического течения пористых материалов (ПМ) на основе феноменологического подхода к построению теории, который предполагает использование и распространение на более общие случаи частных результатов соответствующим образом поставленных экспериментальных работ. Поэтому в ходе проведения частных испытаний материалов должны быть найдены некоторые универсальные функции, отражающие, по возможности наиболее полно, характерные свойства данного материала. Для построения теории и в технологических расчетах процессов деформации заготовок из ПМ наряду с традиционным набором свойств, характерных для компактных (несжимаемых) материалов, необходимо исследование параметров, связанных с их необратимой сжимаемостью и повышением плотности [2–4].

Среди общепринятых видов испытаний механических свойств компактных материалов (растяжение, сжатие, кручение и др.) только при испытании на сжатие реализуется схема напряженного состояния с отрицательным средним напряжением, характерная для процессов деформации ПМ, а другие методы неприменимы из-за низкой пластичности этих материалов. Кроме испытания на одноосное сжатие используют установки трехосного нагружения в камерах высокого давления [3]. Такие установки уникальны, являются дорогостоящим оборудованием и в большинстве случаев недоступны для систематических исследовательских работ, а тем более, в технологической практике. Ограничения в выборе испытаний, их трудоемкость и недостаточность информации для построения полноценной феноменологической теории течения пористых материалов обуславливают актуальность разработки виртуального метода определения физико-механических свойств пористых материалов.

Феноменологический подход в рамках континуальных представлений о пластическом течении ПМ развивается на основе введения так называемых представительных элементов, т. е. минимальных областей, идентичных по свойствам самим порошковым телам. Понятие «представительного элемента» в теории пластичности

сжимаемых материалов аналогично понятию «материальная точка» в традиционной теории пластичности.

Для континуума, заполненного представительными элементами, обладающими свойством сжимаемости, вводятся, как и для несжимаемых материалов, поверхность нагружения и ассоциированный с ней закон течения.

Наиболее часто применяемой для изотропных пористых сред является поверхность нагружения Р. Дж. Грина [5], модифицированную форму записи которой можно представить как [2, 6]

$$\alpha\sigma_i^2 + \beta\sigma^2 = \sigma_{\text{сп}}^2 = \delta\sigma_s^2, \quad (1)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\delta$  – функции относительной плотности  $p = 1 - V_{\text{п}}/V$  и других характеристик материала и процесса деформирования (температуры и т. д.);  $V_{\text{п}}$  – объем пор в пористой заготовке;  $V$  – объем пористой заготовки;  $\sigma_s$  и  $\sigma_{\text{сп}}$  – соответственно напряжения текучести материала основы и пористого тела;  $\sigma_i = \sqrt{(3/2)s_{ij}s_{ij}}$  (здесь и далее  $i, j = 1, 2, 3$ ) – интенсивность напряжений;  $s_{ij}$  – компоненты девиатора напряжений;  $\sigma = \sigma_{ij}/3$  – среднее напряжение (гидростатическое давление).

В соответствии с ассоциированным с поверхностью нагружения (1) законом течения зависимости между деформациями и напряжениями при пластическом течении некомпактного материала определяются следующим образом:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = 3\dot{\lambda} \left( \alpha s_{ij} + \frac{2}{9} \beta \sigma \delta_{ij} \right), \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon}_v = \dot{\epsilon}_{ij} = 2\dot{\lambda}\beta\sigma, \quad (3)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij} - \frac{1}{3} \dot{\epsilon}_v \delta_{ij} = 3\dot{\lambda} \alpha s_{ij}, \quad (4)$$

$$\dot{\lambda} = \frac{\dot{\epsilon}_i}{2\sigma_i}, \quad (5)$$

где  $\dot{\epsilon}_{ij}$  и  $\dot{\epsilon}_{ij}$  – компоненты тензора и девиатора скоростей деформации;  $\dot{\epsilon}_i = \sqrt{\dot{\epsilon}_i^2/\alpha + \dot{\epsilon}_v^2/\beta}$  – интенсивность приведенных скоростей деформаций ПМ;  $\dot{\epsilon}_i = \sqrt{2\dot{\epsilon}_{ij}\dot{\epsilon}_{ij}/3}$  – интенсивность скоростей деформаций,  $\dot{\epsilon}_v$  – скорость объемной деформации.

В приведенных соотношениях экспериментальному определению подлежат материальные функции  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\sigma_{\text{сп}}$  в зависимости от относительной плотности ( $p$ ) и степени деформации ( $\epsilon_0 = \int \dot{\epsilon}_i dt$ ). Для оценки экспериментальных зави-

симостей  $\alpha = \alpha(p)$ ,  $\beta = \beta(p)$  и  $\sigma_{сп} = \sigma_{сп}(\epsilon_0)$  используют испытание на одноосное сжатие спеченных образцов [4].

Было предложено также значительное число теоретических зависимостей для различных материалов, обзор которых представлен в работах [4, 7].

Для получения теоретических зависимостей в большинстве случаев выполняется анализ предельного состояния идеализированных моделей представительного объема пористого материала. В качестве таковых использовались полые толстостенный шар и труба с внутренней шаровой полостью, полый куб с кубической полостью, труба с внутренней цилиндрической полостью и другие простейшие модели.

Расхождения расчетных значений  $\alpha = \alpha(p)$  и  $\beta = \beta(p)$ , по данным различных авторов между собой и результатами эксперимента, существенны. Не представляется возможным выделить теоретические зависимости какого-либо автора сразу для двух функций. Как указывается в работе [4], для некоторых пористых материалов теоретические формулы удовлетворительно описывают одну из функций  $\alpha = \alpha(p)$  или  $\beta = \beta(p)$ , в то время как другая находится из соответствующего теоретического расчета с неприемлемой точностью.

Целью настоящей работы является разработка методики виртуального проведения экспериментальных исследований для определения функций  $\alpha = \alpha(p)$ ,  $\beta = \beta(p)$  и  $\sigma_{сп} = \sigma_{сп}(\epsilon_0)$  на базе конечно-элементного (КЭ) моделирования пластической задачи деформирования представительного элемента (материальной точки) пористого тела, т. е. она основана на применении КЭ-модели деформации образца, удовлетворяющего постулату макрофизической определенности А. А. Ильюшина [8]. Реализация процесса деформации такого образца осуществлялась с использованием разработанного авторами специального программного комплекса [9].

## ИДЕЯ МЕТОДИКИ

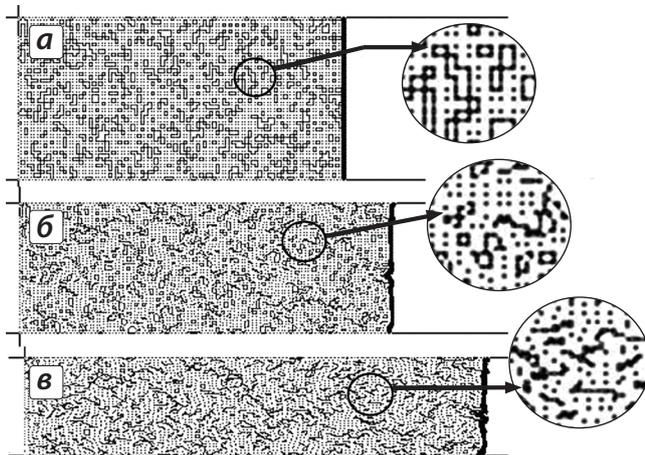
Сущность методики заключается в том, что поведение представительного объема при пластическом течении неоднородных (одно- или много-

компонентных) пористых сред моделируется на примере деформирования элементарной области, изначально заполненной сеткой конечных элементов с различными свойствами. В программном комплексе [9] возможно проведение удовлетворяющих постулату макрофизической определенности А. А. Ильюшина виртуальных испытаний цилиндрических образцов на одноосное сжатие и кручение, а также призматических образцов на сжатие в условиях плоского деформированного состояния без трения на осадочных плитах. Кроме того, в нем предусматривается создание бокового давления при выполнении перечисленных видов испытаний, которое может меняться в соответствии с программой пропорционального нагружения, когда параметр  $\eta = 3\sigma/\sigma_{и} = \text{const}$  в ходе эксперимента.

При данном подходе рассматривается упрочнение за счет пластического деформирования частиц пористой среды и уплотнения путем заполнения пор. Иные механизмы уплотнения (такие, как диффузия, спекание и др.) не учитываются, однако при холодном уплотнении спеченных заготовок они не должны играть существенной роли. Предложенный выше метод может быть распространен для расчета свойств не только материалов, состоящих из однокомпонентной базовой основы и пор, а также и неоднородных (двух- и многокомпонентных) беспористых и пористых композитных сред.

## УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ВИРТУАЛЬНЫХ И ФИЗИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Первая серия виртуальных экспериментов заключалась в следующем. Представительные элементы с начальной относительной плотностью  $p_n = 0,78$  подвергались одноосному сжатию. Плотность выбиралась в соответствии с плотностью образцов для физического эксперимента, использованных для проверки адекватности виртуальных опытов. Представительные элементы формировались в виде прямоугольной двумерной области размером  $100 \times 50$  КЭ. Из них для  $p_n = 0,78$  количеству КЭ, равному  $0,78 \times 100 \times 50$ , присвоены свойства материала основы, а часть КЭ, составляющая  $0,22 \times 100 \times 50$ , случайным образом удалена для формирования пор.



**Рис. 1.** Этапы деформации представительного элемента пористого материала

**а** – начальное состояние КЭ-модели представительного элемента с относительной плотностью  $p_n = 0,78$ , **б** – промежуточное,  $p_n = 0,86$ , **в** – конечный момент уплотнения

На рис. 1 для примера приведены видеокдры осадки представительного элемента в виде цилиндрического образца с начальной плотностью 0,78. Наружный слой элементов сделан «сплошным» для упрощения подсчета объема тела и, соответственно, его текущей относительной плотности ( $p$ ).

Кривая упрочнения принятого для виртуальных и физических экспериментов материала основы (медного порошка марки ПМС-Н) получена путем испытания на осадку образцов из прутковой меди М1, соответствующей по химическому составу порошку марки ПМС-Н, и задана в виде степенной зависимости  $\sigma_s = 435\epsilon^{0,15}$  МПа [10]. Результатами расчета являлись текущий объем представительного элемента и его размеры: высота и средний диаметр, а также текущая относительная плотность и зависимость силы деформации от хода ползуна.

Физические эксперименты были проведены с использованием медного порошка марки ПМС-Н, из которого получали брикеты различной плотности путем прессования в щелевом штампе с двухсторонним приложением нагрузки. Брикетирование производилось в состоянии поставки. Размеры полученных образцов были следующими: высота 30 мм, ширина 30 мм, длина 150 мм. Дозировали порошок по массе путем взвешивания на электронных весах. Всего было подготовлено 10 брикетов с относительной плотностью 0,585. Далее осуществлялось спекание в среде водоро-

да, после которого их относительная плотность составила 0,78. Из брикетов вырезались образцы с диаметром и высотой по 18 мм.

Деформацию проводили на прессе Instron 1255, обеспечивающем точность измерения хода ползуна  $\pm 0,01$  мм и силы деформации  $\pm 2\%$ . Для всех партий образцов она выполнялась ступенчато, с промежуточными разгрузками для измерения текущих размеров и плотности, а также уменьшения сил трения. Плотность определялась гидростатическим взвешиванием. Для уменьшения влияния сил трения применялись также полиэтиленовые прокладки и смазка литол. Шаг изменения степени деформации составлял 0,02–0,04. Испытания прекращались после образования магистральных трещин, приводящих к нарушению целостности образцов (при  $p \approx 0,94$ ).

## МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные в ходе виртуального и физического экспериментов данные обрабатывались по изложенной ниже методике.

Приращение объемной деформации ( $\Delta e_v$ ) связано с приращением относительной плотности ( $\Delta p$ ) следующим образом [2]:

$$\Delta e_v = -\Delta p/p. \quad (6)$$

В данном случае

$$\Delta e_p = \Delta e_\theta, \quad (7)$$

$$\Delta e_v = \Delta e_z + 2\Delta e_p = -\Delta p/p,$$

где  $\Delta e_p$  и  $\Delta e_z$  – приращения радиальной и осевой компонент пластической деформации, которые можно вычислить на основании результатов виртуальных и физических экспериментов:

$$\Delta e_p = -\frac{1}{2} \left( \Delta e_z + \frac{\Delta p}{p} \right), \quad (8)$$

$$\Delta e_z = \ln(h/h_0),$$

где  $h$  и  $h_0$  – соответственно текущее и начальное значения высоты испытуемого образца на каждом этапе ступенчатого нагружения, зафиксированные в эксперименте.

При этом выполняются следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \sigma_p &= \sigma_\varphi = 0, \\ \sigma_z &= -q, \\ \sigma &= -1/3q, \\ s_p &= s_\varphi = 1/3q, \\ s_z &= -2/3q, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $q$  – текущее расчетное давление.

Тогда и коэффициент поперечной деформации определяется через экспериментально измеряемые величины:

$$\mu_p = -\frac{\Delta e_p}{\Delta e_z} = \frac{1}{2p} \left( \frac{\Delta p}{\Delta e_z} + p \right). \quad (10)$$

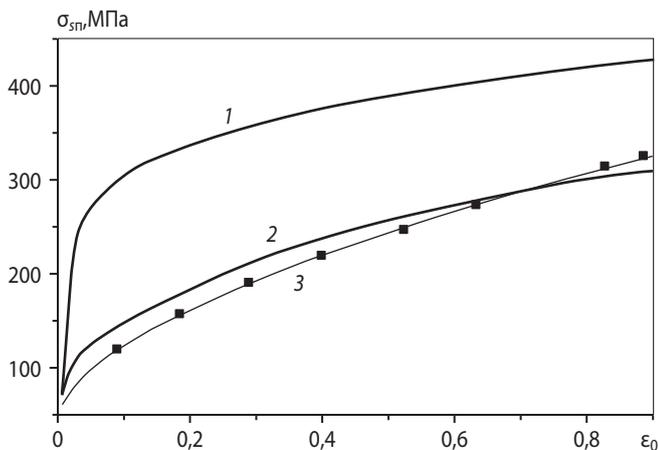
Поскольку из (10) и (2) следует

$$\mu_p = \frac{1(9\alpha - 2\beta)}{2(9\alpha + \beta)}, \quad (11)$$

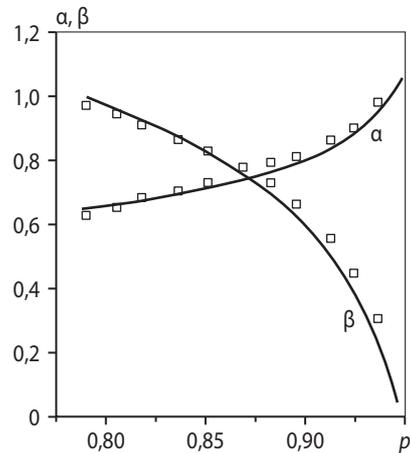
то, подставляя (9), (11) в уравнения (1), (2) и (3), получим выражения для искомых функций от плотности  $\alpha(p)$ ,  $\beta(p)$ ,  $\delta(p)$  через экспериментальные функции  $\mu_p = \mu_p(p)$  и  $q = q(p)$  в виде

$$\begin{aligned} \alpha &= 2(\mu_p + 1)/3, \\ \beta &= 9 - 6(\mu_p + 1), \\ \delta &= \sigma_{ст}^2 / \sigma_s^2, \\ \sigma_{ст} &= q. \end{aligned} \quad (12)$$

На рис. 2 и 3 представлены рассчитанные по формулам (12) величины  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\sigma_{ст}$  на основе результатов физического и виртуального экспериментов.



**Рис. 2.** Зависимости напряжения текучести образцов из пористой меди от степени деформации при осевом сжатии без бокового давления  
1 – кривая упрочнения материала основы;  
2 – виртуальный эксперимент; 3 – физический



**Рис. 3.** Зависимость функций плотности  $\alpha$  и  $\beta$  от текущей плотности представительного объема  
Точки – физический эксперимент, линии – виртуальный

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена новая методика исследования свойств спеченных порошковых материалов, основанная на разработанной КЭ-модели представительного объема пористого тела со случайно распределенными пустыми КЭ-элементами, имитирующими свойства пор. Она может быть рекомендована для практического использования взамен физических экспериментальных исследований.

Методика может быть распространена на многокомпонентные пористые среды для виртуального определения механических и теплофизических характеристик, изменяющихся в процессах уплотнения.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 12-08-00815-а).*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Панов В. С., Чувиллин А. М. Технология и свойства спеченных твердых сплавов и деталей из них: Учеб. пос. для вузов. М.: МИСиС, 2001.
2. Шестаков Н. А., Субич В. Н., Демин В. А. Уплотнение, консолидация и разрушение пористых материалов. М.: Физматлит, 2011.
3. Анциферов В. Н., Перельман В. Е. Механика процессов прессования порошковых и композиционных материалов. М.: ИД «Грааль», 2001.
4. Волкогон Г. М., Дмитриев А. М., Добряков Е. П. и др. Прогрессивные технологические процессы штамповки деталей из порошков и оборудование / Под общ. ред. А. М. Дмитриева, А. Г. Овчинникова. М.: Машиностроение, 1991.
5. Грин Р. Дж. // Механика. 1973. № 4. С. 109–120.

6. Kobayashi S., Oh S. I., Altan T. Metal forming and the finite element method. Oxford, 1989.
7. Doraivelu S. M., Gegel H. L., Malas J. C. et al. // Inter. J. Mech. Sci. 1984. Vol. 26, № 9–10. P. 527–535.
8. Ильющин А. А. Пластичность. Основы общей математической теории. М.: Изд-во АН СССР, 1963.
9. Власов А. В., Шестаков Н. А., Субич В. Н. и др. Программный комплекс Composit. Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ № 2011615526. 2011.
10. Полухин П. И., Гун Г. Я., Галкин А. М. Сопrotивление пластической деформации металлов и сплавов: Справочник. М.: Металлургия, 1976.

УДК 621.785 : 669.1.08.29

## СТРУКТУРА И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ $TiB_2-Al$ , ПОЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНЫМ НАПЫЛЕНИЕМ

© 2014 г. **Д. А. Романов, О. В. Олесюк, Е. А. Будовских,  
В. Е. Громов, Т. С. Самейщева, П. С. Ярцев**

Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ), г. Новокузнецк  
Новосибирский государственный технический университет (НГТУ)

Статья поступила в редакцию 24.01.13 г., доработана 12.12.13 г., подписана в печать 15.12.13 г.

**Д. А. Романов** – канд. техн. наук, доцент кафедры физики СибГИУ (654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42). Тел.: (3843) 78–43–91. E-mail: romanov\_da@physics.sibsiu.ru.  
**О. В. Олесюк** – канд. техн. наук, доцент той же кафедры.  
**Е. А. Будовских** – докт. техн. наук, профессор той же кафедры. E-mail: budovskih\_ea@physics.sibsiu.ru.  
**В. Е. Громов** – докт. физ.-мат. наук, проф., заведующий той же кафедрой. E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru.  
**Т. С. Самейщева** – лаборант кафедры материаловедения в машиностроении НГТУ (630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20). Тел.: (383) 346-06-12. E-mail: bataev@adm.nstu.ru.  
**П. С. Ярцев** – лаборант той же кафедры.

Методами оптической интерферометрии, сканирующей электронной микроскопии и рентгенофазового анализа изучены рельеф поверхности, особенности структуры и фазового состава покрытий системы  $TiB_2-Al$ , полученных электровзрывным напылением. Установлено, что после обработки параметр шероховатости поверхности  $R_a = 2,0$  мкм. Фазовый состав сформированных слоев включает Al,  $TiB_2$  и  $TiBO_3$ . Покрытия имеют когезионно-адгезионную связь с материалом контактной поверхности.

**Ключевые слова:** электровзрывное напыление, износостойкие покрытия, диборид титана, шероховатость, микроструктура, фазовый состав.

By means of optical interferometry, scanning electron microscopy and X-ray phase analysis was examined surface topography, peculiarities of structure and phase composition of coatings in the system  $TiB_2-Al$ , obtained by electroexplosive sputtering. There was established that after treatment parameter of surface irregularity  $R_a = 2 \mu m$ . Phase composition of formed layers includes Al,  $TiB_2$  and  $TiBO_3$ . Coatings have cohesive-adhesive bind with material of contact surface.

**Key words:** electroexplosive sputtering, wear-resisting coatings, titanium diboride, irregularity, microstructure, phase composition.

Алюминий и его сплавы обладают низкими твердостью и износостойкостью, что ограничивает область их практического использования. В ряде работ для устранения этих недостатков применялось лазерное плакирование поверхности таких материалов для формирования композиционных слоев, упрочненных частицами  $TiB_2$  [1–3]. Выбор последних в качестве армирующих частиц обусловлен тем, что соединение  $TiB_2$  имеет высокие значения твердости, модуля упругости, хорошо смачивается расплавом алюминия и при этом в нем не растворяется. Авторами [4] было осуществлено электровзрывное карбоборирование

силумина, что привело к снижению коэффициента трения в 5–6 раз и увеличению микротвердости поверхностного слоя толщиной около 100 мкм до 5,5 раза по отношению к исходному материалу. Причинами упрочнения являлись измельчение зеренной структуры алюминия и пластин кремния вплоть до субмикрометровых размеров и образование наноразмерных частиц интерметаллидов и боридов.

Схема формирования упрочненных слоев на поверхности металлов и сплавов при электровзрывном легировании (ЭВЛ) включает в себя следующие процессы.