

DOI 10.5862/JEST.231.13

УДК 621.762

*А.И. Рудской, Ю.А. Соколов, Н.В. Павлушин*

## **ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ СИНТЕЗА НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ИОННЫМ ПУЧКОМ**

*A.I. Rudskoy, Yu.A. Sokolov, N.V. Pavlushin*

## **THE PROSPECTS OF USING AN ION BEAM TECHNOLOGY FOR SYNTHESIZING NEW MATERIALS**

В статье рассмотрены технологические возможности получения новых материалов с программируемой структурой из порошков различного химического состава, включая порошки химически активных материалов, с использованием технологии синтеза ионным пучком. Рассмотрена схема ионной установки, которая обеспечивает широкие технологические возможности по синтезу многокомпонентных материалов. Показано, что ионный пучок позволяет на одной и той же установке реализовать различные технологические операции: спекание/плавление слоя порошка; модификацию поверхности слоя в результате импульсной обработки

ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ; КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ; СИНТЕЗ ИОННЫМ ПУЧКОМ; ГРАНУЛЫ; МАССОПЕРЕНОС; ГАЗОВАЯ СРЕДА.

The article discusses the technological opportunities of obtaining new materials with programmable structure from powders of various chemical compositions, including powders of chemically active materials, by using an ion beam synthesis technology. A scheme of an ionic installation which provides ample technological opportunities for synthesizing multicomponent materials is considered. It has been shown that the ion beam allows to implement various technological operations with the same installation, such as agglomerating/melting powder layers, or modifying the layer surface through pulse processing.

POWDER METALLURGY; COMPOSITE MATERIALS; IONIC BUNCH SYNTHESIS; GRANULES; HEAT- MASS TRANSFER; GAS ENVIRONMENT.

### **Введение**

Развитие авиационной и ракетно-космической техники невозможно без создания новых конструкционных материалов. Существующие технологические решения для увеличения прочности, твердости, износостойкости, теплостойкости материалов (напыление, наплавка защитных покрытий) не всегда обеспечивают

длительный цикл эксплуатации [1–11]. Новая и обоснованно перспективная возможность повышения эксплуатационных свойств конструкционных и инструментальных материалов – технология синтеза изделий ионным пучком (СИП). Создание технологии СИП, разработка принципиально нового технологического оборудования открывают новые возможности по созданию

композиционных материалов (КМ) из порошка различного химического состава, получению материалов с программированной структурой и заранее прогнозируемыми свойствами [3–4, 12–14].

Цель работы — анализ возможных технологических решений промышленной реализации процесса получения порошковых и композиционных материалов, использующего синтез ионным пучком.

### Преимущества процесса синтеза ионным пучком

В отличие от широко распространенной технологии быстрого прототипирования лазерным или электронным лучом [12, 15–16], новый подход позволяет следующее:

открывать новые возможности по формированию химического состава композиционного материала; в качестве носителей могут быть использованы ионы различных газов, которые при бомбардировке металлического порошка могут образовывать новые химические соединения, модифицировать поверхность порошка;

значительно повысить точность изготовления изделий (размеры кроссовера ионного пучка при ускоряющем напряжении 120–150 кВ достигают 1 мкм, что на два порядка меньше электронного пучка);

получать многокомпонентные сплавы из порошка различного химического состава;

использовать при синтезе порошки химически активных тугоплавких металлов, так как процесс реализуется в вакууме;

формировать структуру КМ непосредственно во время «роста» изделия.

Перечень ионов, которые можно получить из дуоплазматрона, практически не ограничен. Многие металлы могут переходить в газообразное состояние при соединении с другими элементами таблицы Менделеева. Ионы можно получать не только из однокомпонентных газов (кислород  $O_2$ , водород  $H_2$ , азот  $N_2$ , аргон Ar, гелий He и пр.), но и из многокомпонентных, таких, как углекислый газ  $CO_2$  (ионы углерода  $C^-$  и кислорода), фтористый бор  $BF_3$  (ионы бора  $B^-$  и ионы фтора  $F^-$ ), тетрафторид кремния  $SiF_4$  (ионы кремния  $Si^-$  и ионы фтора  $F^-$ ), фторид фосфора  $PF_5$  (ионы фосфора  $P^-$  и ионы фтора  $F^-$ ) и др.

### Возможные технологические схемы реализации процесса

Рассмотрим несколько новых схем формирования композиционного изделия с помощью ионного пучка.

1. Нанесение на поверхность изделия тонкой пленки методом термического испарения с последующей обработкой ионным пучком образовавшейся поверхности, плавление пленки, заполнение пор между порошком более тугоплавкого металла (рис. 1).

2. Послойная бомбардировка ионами газа металлического порошка (рис. 2). Ионный пучок 2 перемещается по подложке или формируемому изделию со скоростью сканирования  $V_{ск}$ . Это

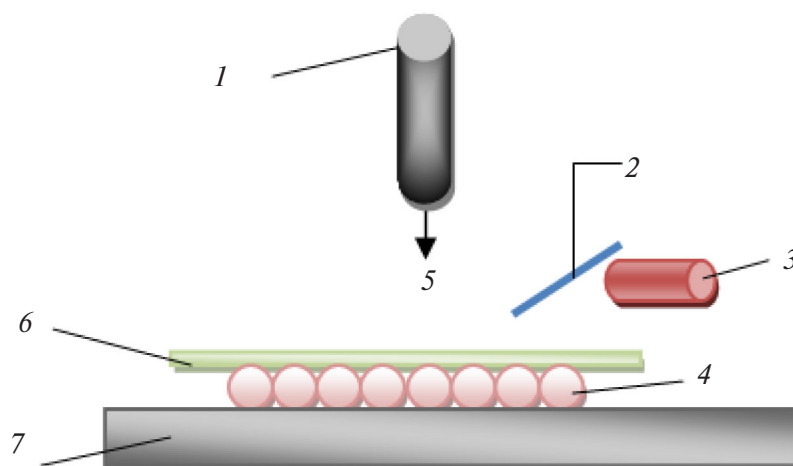


Рис. 1. Формирование слоя изделия ионным пучком и методом термического испарения (1 — дуоплазматрон; 2 — проволока; 3 — испаритель; 4 — порошок; 5 — ионный пучок; 6 — пленка; 7 — подложка)

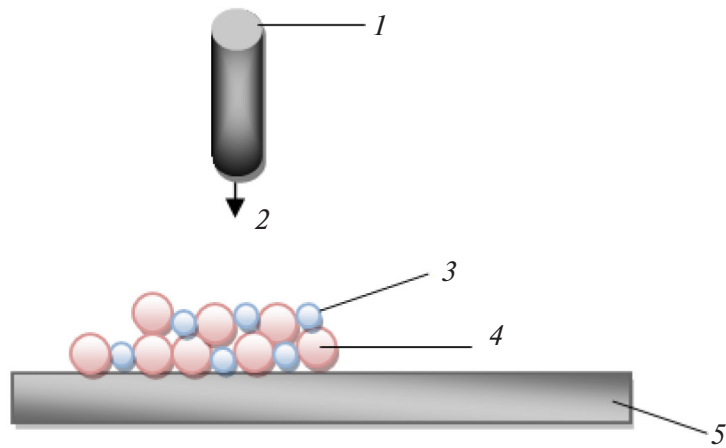


Рис. 2. Формирование слоя изделия ионным пучком (1 – дуаплазмотрон; 2 – ионный пучок; 3 – порошок первого химического состава; 4 – порошок второго химического состава; 5 – подложка)

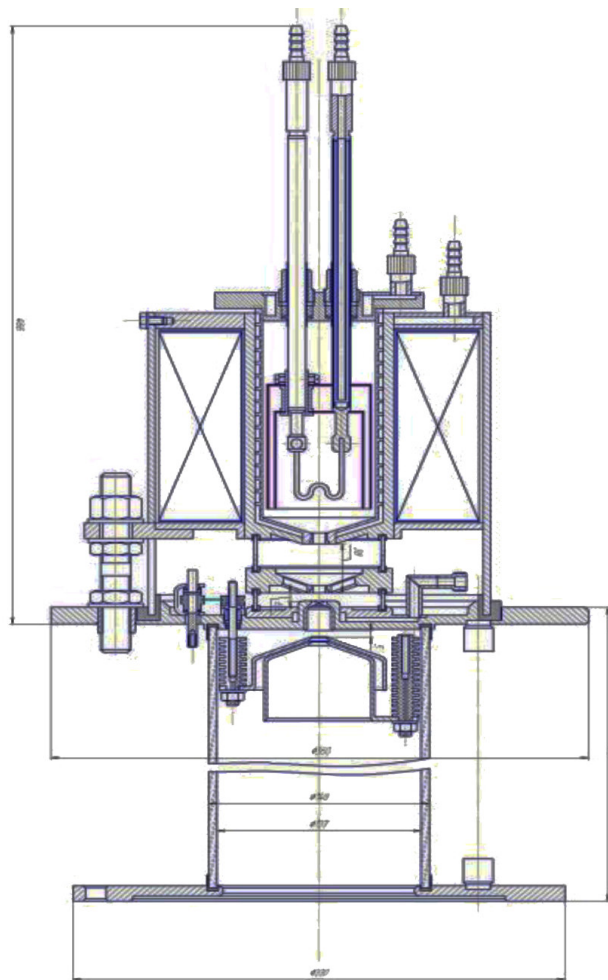


Рис. 3. Дуаплазмотрон с осцилляцией электронов

эквивалентно действию (приложению) периодической тепловой нагрузки с длительностью импульса  $d_o/V_{ск}$  ( $d_o$  – диаметр пучка в месте его встречи с поверхностью объекта). К числу параметров оперативного управления во время технологического процесса можно отнести ток  $I_{п}$  пучка, скорость  $V_{ск}$  сканирования пучка, кроссовер (диаметр)  $d_o$  пучка, шаг смещения  $s_{см}$  пучка при сканировании поверхности, размеры  $x_i$  и  $y_i$  сканируемой площади (угол отклонения ионного пучка).

Процесс СИП происходит в вакуумной камере, в основном определяемой максимальными размерами изделия. Схема дуоплазматрона с осцилляцией электронов, приведенная на рис. 3, содержит следующие элементы: 1 – прямоугольный катод; 2 и 3 – промежуточные электроды; 4 – катушка электромагнита; 5 – регулирующий электрод; 6 – анод; 7 – отверстие катодной камеры; 8 – патрубок подачи рабочего газа.

Ноль ионного пучка находится на оптической оси дуоплазматрона. Ускоряющее напряжение дуоплазматрона обычно составляет от 120 до 150 кВ и остается постоянной величиной в течение всего технологического процесса.

При нагреве катода 1 (рис. 3) до высокой температуры происходит термоэлектронная эмиссия, в результате которой образуются электронное облако и плазма, возникает двойной электрический слой между плазмой и окружающей ее металлической поверхностью, которая находится под потенциалом катода. Через отверстие 7 катодной камеры промежуточным электродом 2, который находится под небольшим положительным потенциалом (10–15 В) относительно катода, электроны вытягиваются и ускоряются.

Ускоренные электроны ионизируют рабочий газ, который подается через отверстие в промежуточном электроде 2, теряют свою энергию и попадают на поверхность этого электрода. Электроны, не столкнувшиеся с атомами, пролетают через отверстие в электроде 2, отражаются электродом 3, который находится под отрицательным потенциалом относительно электрода 2, и летят в обратную сторону. Электроны и образовавшаяся плазма удерживаются на оси при помощи как электростатических линз, образующихся поверхностями электродов, так и магнитным полем от электромагнита 4.

Полученный электронно-плазменный шнур фокусируется на малом отверстии промежуточ-

ного электрода 3. Из-за разности давлений в дуоплазматроне и рабочем объеме плазма из шнура выталкивается в раздаточную чашу электрода 3. Ионы вытягиваются и ускоряются из плазмы анодом 6. Электрод 5 регулирует ионный ток и осуществляет предварительную фокусировку ионов в пучок. Давление в катодной части дуоплазматрона составляет  $1 \cdot 10^{-1}$  мм рт.ст., в рабочей камере установки –  $1 \cdot 10^{-5}$  мм рт.ст.

### Технология получения композиционных материалов синтезом ионным пучком

Рассмотрим более детально новую технологию применительно к получению нового композиционного материала. В качестве исходного продукта используются порошки вольфрама W и алюминия Al. При обработке порошка алюминия ионным пучком  $C^-$  из дуоплазматрона металл начинает плавиться и происходит образование твердой фазы карбида алюминия  $Al_4C_3$  в виде микрористаллов. В результате образуется двухфазная смесь чистого расплавленного алюминия Al с карбидом алюминия  $Al_4C_3$ , который заполняет поры между порошком вольфрама. В результате обработки слоя ионным пучком получается композиционный материал, обладающий следующими свойствами:

- высокой механической прочностью, которая обусловлена присутствием порошка вольфрама;
- высокой жаропрочностью, способностью материала сохранять эксплуатационные свойства при высоких температурах (до 2000 °С);

- высокой жаростойкостью, определяемой процентным содержанием алюминия в материале.

Обработка порошка вольфрама ионами углерода до подачи алюминия позволяет получить карбид вольфрама, обладающий алмазоподобными свойствами. Таким образом, формируется КМ со следующими слоями: вольфрам – карбид вольфрама – оксид алюминия – карбид алюминия. Рассмотренная композиция приведена в виде примера, так как технология СИП универсальна и позволяет формировать КМ из различных элементов таблицы Менделеева.

Схема формирования химического состава КМ по технологии СИП аналогична схеме получения бетона: порошок вольфрама окружен жидким алюминием, который выполняет функцию воды в бетоне – за счет сил смачивания и поверхностного натяжения удерживает порошок

вольфрама в исходном положении. Карбид алюминия предотвращает окисление металлов и увеличивает интегральную площадь смачивания алюминием композиции  $W+Al_4C_3$ . Такой материал обладает повышенными механическими свойствами, высокой жаропрочностью и жаростойкостью.

Управление ионным пучком аналогично управлению электронным лучом, но отличается малым диаметром кроссовера – он может составлять от 0,1 мкм, что дает возможность формировать изделие с точностью до диаметра частиц порошка.

Нагрев каждой элементарной ячейки (ЭЯ) происходит за время, равное времени перемещения ионного пучка над этой ячейкой. Под ЭЯ будем подразумевать выделенный объем размером  $d \times d \times h$ , где  $h$  – высота изделия и/или подложки.

При прохождении ионного пучка над ЭЯ данный объем нагревается до температуры  $T_{эя}$ , теряет тепло в результате радиационного теплообмена и теплопередачи с соседними элементами, принимает часть тепла от соседних элементов во время их нагрева ионным пучком.

Можно выделить следующие основные этапы технологии послойного синтеза изделий:

предварительный нагрев подложки до заданной температуры;

формирование специальной поддержки изделия (сетка), обеспечивающей в дальнейшем легкое снятие изделия с подложки;

синтез изделия, включающий нанесение слоя порошка, формирование внешнего и внутреннего контуров, предварительный нагрев слоя порошка на малом токе (спекание слоя для удерживания порошка при действии электромагнитных сил в процессе обработки слоя большими токами), плавление порошка в определенном сечении изделия.

Предварительный прогрев подложки, создающий необходимые начальные тепловые условия для проведения процесса синтеза, осуществляется сканированием ионного пучка по поверхности. Необходимо выбрать способ сканирования и рассчитать параметры нагрева подложки ионным пучком до заданной температуры  $T_{зад}$ . Основная задача на данном этапе – достичь равномерного температурного поля по всей поверхности подложки. Одним из инструментов решения этой задачи служит выбор оптимального способа сканирования поверхности обработки. Ионный пучок во время обработки может

сканировать поверхность несколькими способами: по строкам, по столбцам, по спирали, в случайном порядке. За время нагрева тепло источника распространяется по всей подложке.

К исходным параметрам процесса СИП относятся: расстояние между срезом дуоплазматрона и подложкой; материал и геометрические размеры (длина  $\times$  ширина  $\times$  высота); размеры опор, на которые устанавливается подложка. Например, если подложка устанавливается на четыре цилиндрические опоры, можно говорить о радиационном теплообмене между, с одной стороны, подложкой и изделием, с другой стороны, – тепловыми экранами установки.

Использование концентрированного потока ионов в процессе СИП позволяет управлять структурой изделия, обеспечивать локальное воздействие на элементарную ячейку, формируя тем самым сплав с заданным сочетанием порошков различного химического состава.

Вследствие высоких скоростей нагрева и охлаждения (до  $10^5$  °C/c) формируется структура сплава с мелким зерном. Известна следующая зависимость расстояния  $d$  между дендритными ветвями второго порядка от скорости охлаждения [1]:

$$d = a/V_{\text{охл}}^n,$$

где  $a$  и  $n$  – постоянные;  $V_{\text{охл}}^n$  – скорость охлаждения.

Скорость зарождения кристаллов увеличивается с ростом скорости охлаждения, что приводит к пропорциональному уменьшению размера зерен.

Повышение свойств КМ производится путем корректировки комбинации, режимов синтеза изделий и термообработки. Технология СИП позволяет проводить термическую обработку в импульсном или непрерывном режиме не только поверхностного слоя, но и в процессе «роста» изделия, формируя тем самым программную структуру, например с упрочняющими фибрами. Влиять на структуру материала можно, регулируя следующие параметры: скорость нагрева, температуру, время выдержки при заданной температуре, скорость охлаждения.

Управляющими параметрами для получения в каждом слое материала заданной структуры служат ток пучка, скорость сканирования, диаметр пучка в месте встречи с мишенью, время импульса пучка, время паузы.



Вакуумная система обеспечивает откачку воздушной среды из камеры с помощью низко- и высоковакуумных насосов, запорной аппаратуры. Контроль давления в камере и рабочих точках осуществляется по показаниям вакуумных датчиков. Вакуумная система выполняет следующие технологические операции:

- получение в рабочей камере низкого вакуума;
- подготовку диффузионного высоковакуумного насоса к работе;
- отключение низковакуумной линии;
- включение диффузионного насоса на камеру и получение высокого вакуума;
- последовательное отключение высоковакуумной линии по окончанию процесса синтеза;
- напуск атмосферного давления в рабочую камеру.

Управление системой откачки и контроль состояния осуществляется в автоматическом режиме программируемым контроллером. Программное обеспечение контроллера обеспечивает последовательное управление исполнительными элементами вакуумной системы в соответствии с заданным режимом работы (подготовка вакуумной системы к работе, создание рабочего вакуума, проверка натекания, окончание работы). Электрическое управление включает набор блокировок, гарантирующих безопасную работу и эксплуатацию установки, включая аварийную программу.

Вычислительный потенциал системы управления, реализованный на базе индустриального компьютера, программируемого контроллера и сенсорной панели, обеспечивает возможность интеграции функций проектирования технологии в машинном масштабе времени и управление процессом спекания/плавления в реальном масштабе времени.

Функции системы управления установкой можно определить, имея в виду совокупность ее внешних взаимодействий:

- перемещение механизмов стола электромеханического комплекса (геометрическая задача);
- последовательно-параллельное управление дискретными механизмами, элементами вакуумной системы (логическая задача);
- взаимосвязанное управление источником питания дуоплазматрона и приводами перемещений стола (технологическая задача);
- организацию интерфейса с оператором (терминальная задача);

идентификацию состояния технологической системы, формирование файлов состояния элементов Т-системы, файлов событий и аварийных ситуаций (диагностическая задача);

- документирование технологического процесса синтеза изделий (архивная задача);
- математическое моделирование технологического процесса (задача оптимизации);
- диспетчеризацию перечисленных выше задач (системная задача).

В качестве управляющей компоненты для решения геометрической задачи позиционирования выбран программируемый логический контроллер (ПЛК), который представляет собой управляющую машину реального времени, формирующую сигналы на исполнительные органы стола в соответствии с заданной управляющей программой (УП) и информацией о состоянии управляемого объекта.

Промышленный компьютер, на базе которого реализован специализированный генератор, и ПЛК выполняют технологическую задачу управления, т.е. реализует совместную работу механических и технологических осей (ток пучка, ток фокусировки, токи отклоняющих систем по осям X и Y).

Логическая задача управления реализована на базе ПЛК, который организует последовательное выполнение операций по управлению исполнительными элементами вакуумной системы, рабочих и вспомогательных механизмов установки в соответствии с заданным алгоритмом работы.

Организация диалога с оператором (терминальная задача) выполняется через человеко-машинный интерфейс. Экран панели оператора, как правило, разделен на функциональные окна, отражающие следующее:

- мнемосхемы вакуумных станций, параметры энергетических комплексов, манипуляторов установки;
- режим управления (наладочный, ручной, автоматизированный, автоматический);
- диагностические, аварийные сообщения об отклонениях параметров от технологического регламента.

Для управления электронным пучком во времени и пространстве применяется специализированный функциональный генератор, реализованный на базе промышленного компьютера,

оснащенного модулями цифро-аналогового преобразования, которые формируют сигналы управления отклоняющей системой.

Генератор позволяет:

строить, редактировать формы траектории пучка и программно выводить их с заданной частотой для управления пучком;

задавать различные режимы изменения тока пучка и фокусировки.

Таким образом, мультипроцессорная СУ, выполненная на базе промышленного компьютера и программируемого контроллера, позволяет реализовать разработанный алгоритм послойного синтеза изделий в автоматическом режиме с высокой повторяемостью результатов.

### Выводы

Процесс синтеза ионным пучком позволяет получать новые материалы с программируемой структурой из порошков различного химического состава, включая порошки химически активных материалов.

В процессе «роста» изделия можно осуществлять формирование заданной структуры изделия

с помощью локальной термической обработки изделия ионным пучком. Высокая энергия электронного пучка позволяет добиться высокой скорости плавления слоя и малого времени кристаллизации расплавленного металла, что обеспечивает формирование изделия с высокими механическими и теплофизическими свойствами.

Рассмотрена схема ионной установки, которая обеспечивает широкие технологические возможности по синтезу многокомпонентных материалов.

Предложенные технические решения позволяют увеличить количество методов управления структурой изделия, повысить уровень управляемости и повторяемости параметров технологического процесса, исключить влияние субъективных факторов на процесс синтеза.

Ионный пучок позволяет на одной и той же установке реализовать различные технологические операции (спекание/плавление слоя порошка).

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства образования и науки Российской Федерации по программе поддержки ведущих научных школ РФ, грант № НШ-6413.2014.8

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герман Рендалл М. Порошковая металлургия от А до Я: Учебно-справочное руководство / Пер. с англ. О.В. Падалко и Г.А. Либенсон. Москва: ИД Интеллект, 2009. 336 с.
2. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А. Технология послойного электронно-лучевого синтеза порошковых изделий в вакууме // Заготовительные производства в машиностроении. 2014. № 8. С. 40–45.
3. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А., Копаев В.Н. Особенности моделирования процесса послойного синтеза изделий электронным лучом // Журнал технической физики. 2015. Т. 85. № 11. С. 91–96.
4. Соколов Ю.А., Кондратьев С.Ю., Лукьянов А.А. Получение изделий из композиционных материалов методом электронно-лучевого синтеза и исследование их свойств // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 2. С. 35–41.
5. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А. Алгоритм и технологические процессы синтеза порошковых деталей электронным лучом в вакууме // Технология машиностроения. 2015. № 1. С. 11–16.
6. Либенсон Г.А., Лопатин В.Ю., Комарницкий Г.В. Процессы порошковой металлургии: В 2-х томах. Т.
7. Формование и спекание. М.: Изд-во МИСИС, 2002. 320 с.
7. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Кокорин В.Н. Прессование гетерофазных увлажненных порошковых металлических смесей для повышения качества высокоплотных заготовок с использованием метода интенсивного уплотнения // Справочник. Инженерный журнал. 2011. № 6. С. 12–16.
8. Рудской А.И., Кокорин В.Н., Кондратьев С.Ю., Филимонов В.И., Кокорин А.В. Прессование гетерофазных увлажненных железных порошков при использовании метода интенсивного уплотнения // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 5 (23). С. 13–20.
9. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Кокорин В.Н., Сизов Н.А. Исследование процесса уплотнения при ультразвуковом воздействии на увлажненную порошковую среду // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 178. С. 148–155.
10. Kondrat'ev S.Y., Goryunin V.I., Popov V.O. Optimization of the parameters of the surface-hardened layer in laser quenching of components // Welding International. 2012. Т. 26. № 8. С. 629–632.
11. Кондратьев С.Ю., Горынин В.И., Попов В.О. Оптимизация параметров поверхностно-упрочнен-

ного слоя при лазерной закалке деталей // Сварочное производство. 2011. № 3. С. 11–15.

12. **Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А., Копяев В.Н.** Исследование движения расплавленной гранулы по поверхности формируемого изделия в процессе электронно-лучевого синтеза изделий // Металлообработка. 2014. № 1 (79). С. 27–31.

13. **Колбасников Н.Г., Кондратьев С.Ю.** Структура. Энтропия. Фазовые превращения и свойства металлов / Федеральное агентство по образованию, Санкт-Петербургский гос. политехнический ун-т. СПб., 2006. 363 с.

14. **Кондратьев С.Ю.** Механические свойства металлов: учебное пособие / М-во образования и науки Российской Федерации, Санкт-Петербургский гос. политехнический ун-т. СПб., 2011. 128 с.

15. **Муслиенко В.Т.** Закономерности образования гранул при центробежном распылении вращающейся заготовки // В кн.: Металлургия гранул. М.: ВИЛС, 1983. Вып. 1. С. 41–48.

16. **Орлов В.К.** К расчету скоростей охлаждения капель расплывленного металла в газовой среде. В кн.: Металлургия гранул. М.: ВИЛС, 1983. Вып. 1. С. 67–77.

## REFERENCES

1. **German Rendall M.** Poroshkovaya metallurgiya ot A do Ya. Uchebno-spravocnoye rukovodstvo [Powder metallurgy from A to Y. Educational reference guide] / Per. s angl. O.V. Padalko i G.A. Libenson. Moskva: ID Intellect, 2009. 336 s.

2. **Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Sokolov Yu.A.** Tekhnologiya posloynogo elektronno-lucheвого синтеза poroshkovykh izdeliy v vakuume [Technology of layer-by-layer electron beam synthesis of powder products in vacuum]. *Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyenii*. 2014. № 8. S. 40–45. (rus.)

3. **Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Sokolov Yu.A., Kopayev V.N.** Osobennosti modelirovaniya protsessa posloynogo синтеза izdeliy elektronnym luchom [Features of modeling of process of layer-by-layer synthesis of products electronic beam]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2015. T. 85. № 11. S. 91–96. (rus.)

4. **Sokolov Yu.A., Kondratyev S.Yu., Lukyanov A.A.** Polucheniye izdeliy iz kompozitsionnykh materialov metodom elektronno-lucheвого синтеза i issledovaniye ikh svoystv [Receiving products from composite materials by method of electron beam synthesis and research of their properties]. *Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyenii*. 2015. № 2. S. 35–41. (rus.)

5. **Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Sokolov Yu.A.** Algoritm i tekhnologicheskiye protsessy синтеза poroshkovykh detaley elektronnym luchom v vakuume [Algorithm and technological processes of synthesis of powder details an electronic beam in vacuum]. *Tekhnologiya mashinostroyeniya*. 2015. № 1. S. 11–16. (rus.)

6. **Libenson G.A., Lopatin V.Yu., Komarnitskiy G.V.** Protsessy poroshkovoy metallurgii. [Processes of powder metallurgy]: V 2-kh tomakh. T.2. Formovaniye i spekaniye. Moskva: Izd-vo MISIS, 2002. 320 s. (rus.)

7. **Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Kokorin V.N.** Pressovaniye geterofaznykh uvlazhnennykh poroshkovykh metallicheskiykh smesey dlya povysheniya kachestva vysokoplotnykh zagotovok s ispolzovaniyem metoda intensivnogo uplotneniya [Pressing of the

heterophase moistened powder metal mixes for improvement of quality of high density preparations with use of a method of intensive consolidation]. *Spravocchnik. Inzhenernyy zhurnal*. 2011. № 6. S. 12–16. (rus.)

8. **Rudskoy A.I., Kokorin V.N., Kondratyev S.Yu., Filimonov V.I., Kokorin A.V.** Pressovaniye geterofaznykh uvlazhnennykh zheleznykh poroshkov pri ispolzovanii metoda intensivnogo uplotneniya [Pressing of the heterophase moistened iron powders when using a method of intensive consolidation]. *Naukovyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii*. 2013. № 5 (23). S. 13–20. (rus.)

9. **Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Kokorin V.N., Sizov N.A.** Issledovaniye protsessa uplotneniya pri ultrazvukovom vozdeystvii na uvlazhnennuyu poroshkovuyu sredu [Research of process of consolidation at ultrasonic impact on the humidified powder environment]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2013. № 178. S. 148–155. (rus.)

10. **Kondrat'ev S.Y., Gorynin V.I., Popov V.O.** Optimization of the parameters of the surface-hardened layer in laser quenching of components. *Welding International*. 2012. T. 26. № 8. S. 629–632. (rus.)

11. **Kondratyev S.Yu., Gorynin V.I., Popov V.O.** Optimizatsiya parametrov poverkhnostno-uprochnennogo sloya pri lazernoy zakalke detaley [Optimization of parameters of the superficial strengthened layer at laser training of details]. *Svarocnoye proizvodstvo*. 2011. № 3. S. 11–15. (rus.)

12. **Kondratyev S.Yu., Sokolov Yu.A., Kopayev V.N.** Issledovaniye dvizheniya raspavlennoy granuly po poverkhnosti formiruyemogo izdeliya v protsesse elektronno-lucheвого синтеза izdeliy [Research of the movement of the melted granule on a surface of the formed product in the course of electron beam synthesis of products]. *Metalloobrabotka*. 2014. № 1 (79). S. 27–31. (rus.)

13. **Kolbasnikov N.G., Kondratyev S.Yu.** Struktura. Entropiya. Fazovyye prevrashcheniya i svoystva metallov [Structure. Entropy. Phase transformations and properties



of metals] / Federalnoye agentstvo po obrazovaniyu, Sankt-Peterburgskiy gos. politekhnicheskiy un-t. SPb, 2006. 363 s. (rus.)

14. **Kondratyev S.Yu.** Mekhanicheskiye svoystva metallov: uchebnoye posobiye. [Mechanical properties of metals] / M-vo obrazovaniya i nauki Rossiyskoy Federatsii, Sankt-Peterburgskiy gos. politekhnicheskiy un-t. SPb, 2011. 128 s. (rus.)

15. **Musiyenko V.T.** Zakonomernosti obrazovaniya granulprirentrobeznom raspilenii vrashchayushcheysya

zagotovki [Regularities of formation of granules at centrifugal dispersion of the rotating preparation]. V kn.: Metallurgiya granul. M.: VILS, 1983. Vyp. 1. S. 41–48. (rus.)

16. **Orlov V.K.** K raschetu skorostey okhlazhdeniya kapel raspylennogo metalla v gazovoy srede [To calculation of speeds of cooling of drops of the sprayed metal in the gas environment]. V kn.: Metallurgiya granul. M.: VILS, 1983. Vyp. 1. S. 67–77.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

**РУДСКОЙ Андрей Иванович** – доктор технических наук член-корреспондент РАН ректор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.  
195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.  
E-mail: rector@spbstu.ru

**RUDSKOY Andrey I.** – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.  
E-mail: rector@spbstu.ru

**СОКОЛОВ Юрий Алексеевич** – кандидат технических наук главный конструктор ООО «НТК Электромеханика».  
172386, ул. Заводское шоссе, 2, г. Ржев, Россия.  
E-mail: s5577@inbox.ru

**SOKOLOV Yuriy A.** – “Electromechanica”.  
2, Zavodskoe shosse, Rzhev city Tver region, Russia, 172386.  
E-mail: s5577@inbox.ru

**ПАВЛУШИН Николай Викторович** – начальник Центра научных исследований и технического обслуживания вакуумной техники ГП НПКГ «Зоря» - «Машпроект».  
Украина, 54018, г. Николаев, пр. Октябрьский 42-а.  
E-mail: nvpavlushin@itenterprise.net

**PAVLUSHIN Nikolay V.** – SE Research and Production Complex «Zorya»-«Mashproekt».  
Ukraine, 54018, Nikolaev, etc.. The October 42-a.  
E-mail: nvpavlushin@itenterprise.net