



DOI: 10.18721/JEST.26105  
УДК 621.762:669.71:004.94

*А.А. Григорьев<sup>1</sup>, А.И. Дмитрюк<sup>2</sup>*

1 – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

2 – Концерн «Росэнергоатом», Ленинградская АЭС, г. Сосновый Бор, Россия

## **РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭКСТРУЗИИ БРИКЕТОВ ПОРОШКОВ АЛЮМИНИЯ**

Разработан алгоритм расчета усилия экструзии на протяжении процесса прессования брикетов порошка алюминия. Алгоритм позволяет предварительно определить энергосиловые параметры процесса, особенно на начальном этапе: усилие, мощность, скорость. Исходными параметрами для расчетов являются характеристики материала: плотность брикета (насыпная плотность), размеры брикета; степень деформации (вытяжки), сопротивление деформации в зависимости от скорости деформации и температуры; а также геометрические и скоростные параметры процесса: вид прессования (прямое или обратное), размеры прессовой оснастки (длина, диаметр), размеры матрицы (вплоть до размеров калибрующего пояса), коэффициент трения (учет смазки для прессования), скорость движения пресс-блока. Показано, что наличие нестационарных участков прессования и зависимость сопротивления от скорости деформации приводят к нестабильности процесса, а соответственно, к неравномерности свойств получаемых прутков. Однако представленный алгоритм позволяет рассчитать и снизить этот отрицательный эффект при применении систем автоматизации (стабилизирующих систем скорость-усилие) с соответствующей регулировкой.

*Ключевые слова:* порошковая металлургия, экструзия, алюминий, технология, моделирование.

*Ссылка при цитировании:*

Григорьев А.А., Дмитрюк А.И. Расчет технологических параметров экструзии брикетов порошков алюминия // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2020. Т. 26, № 1. С. 53–61. DOI: 10.18721/JEST.26105

Эта статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

*A.A. Grigoriev<sup>1</sup>, A.I. Dmitryuk<sup>2</sup>*

1 – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

2 – Rosenergoatom, Leningradskaya AES, Sosnoviy Bor, Russia

## **CALCULATION OF TECHNOLOGY PARAMETERS OF ALUMINUM POWDER EXTRUSION**

An algorithm has been developed for calculating the extrusion force during the process of pressing briquettes of aluminum powder. The algorithm allows you to pre-determine the energy-power parameters of the process, especially at the initial stage: effort, power, speed. The initial parameters for the calculations are material characteristics: briquette density (bulk density), briquette dimensions; degree of deformation (drawing), deformation resistance depending on the strain rate and temperature; as well as geometric and speed parameters of the process: the type of pressing (direct or reverse), the dimensions of the press tool (length, diameter), the dimensions of the matrix (up to the size of the calibrating girdle), the friction coefficient (taking into account the lubricant for pressing), the speed of the press block. It is shown that the presence of unsteady pressing sections and the dependence of the resistance on the strain rate lead to

process instability and, consequently, to the uneven properties of the resulting bars. However, the presented algorithm allows us to calculate and reduce this negative effect when using automation systems (stabilizing speed-force systems) with appropriate adjustment.

*Keywords:* powder metallurgy, extrusion, aluminum, technology, simulation.

*Citation:*

A.A. Grigoriev, A.I. Dmitryuk, Calculation of technology parameters of aluminum powder extrusion, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 26 (01) (2020) 53–61 DOI: 10.18721/JEST.26105

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

**Введение.** Развитие машиностроения в настоящее время в значительной степени происходит за счет использования новейших материалов, полученных путем применения современных технологий, в том числе порошковой металлургии и нанотехнологий [1–5]. В таких материалах происходят структурные и физико-химические изменения на уровне, сопоставимом с размерами отдельных молекул, что обеспечивает высокие технологические, эксплуатационные, а также специальные свойства [6–9]. В технологическую схему порошковой металлургии часто входят операции интенсивной деформации [10–12]: прессования, выдавливания, прокатки, штамповки и т. д. При этом происходит уплотнение [13–14] и компактирование материала при высоких температурах и степенях деформации [15, 16]. Для проведения экспериментов и выпуска ограниченных партий деталей машин из наноматериалов может быть применено уже имеющееся оборудование для деформирования литых, классических материалов [17]. Однако, при внедрении в серийное производство, относительно высокие прочностные свойства деформируемых материалов вызывают ряд проблем, связанных с необходимостью применения специализированного оборудования и оснастки, позволяющих обрабатывать материалы с наибольшей экономической эффективностью [18]. Без этого, получается дорогостоящий продукт, не выдерживающий конкуренции в рыночных условиях.

Целью настоящего исследования является построение алгоритма расчета усилия от хода пуансона при прессовании и сравнение теоретически и практически полученных данных. Основная задача – исследование первого пика как результата среза в начале процесса прессования.

#### Методика исследования

Исследование процесса прессования при высоких температурах показало, что типичная кривая зависимости усилия от хода пуансона имеет два характерных пика (рис. 1).

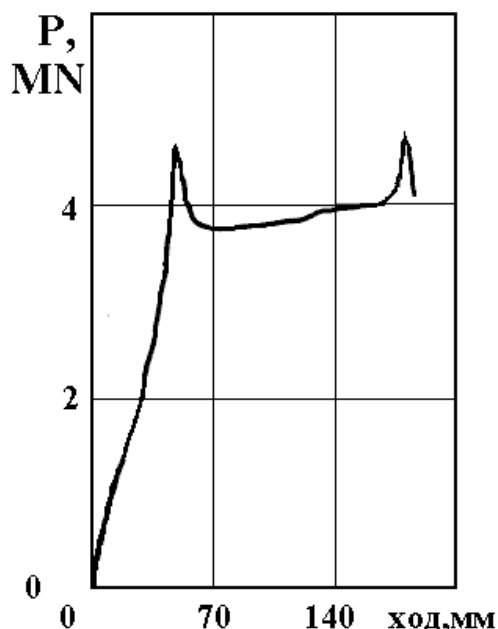


Рис. 1. Общий вид кривой зависимости усилия прессования от хода пресса

Fig. 1. General view of the curve of the dependence of the pressing force on the stroke of the press

Исследование и предварительное моделирование величин этих пиков является весьма актуальным, так как соответствующие пикам наибольшие усилия оказывают влияние на выбор деформирующего оборудования (мощности пресса, которая является основным параметром деформирующих прессов), также на величину пресс-остатка, который определяется величиной конечного давления. В случае прессования алюминиевых материалов на практике применяются плоские матрицы (фильеры), что объясняется большой склонностью алюминия к налипанию, и в этом случае предварительный расчет в зависимости от возможностей (усилия пресса) позволяет уменьшить пресс-остаток и соответственно повысить коэффициент использования материала.

Наличие первого пика на кривой зависимости усилия от хода пуансона объясняется рядом причин:

1. переход от контактного трения покоя к трению скольжения, который всегда связан с понижением напряжения трения;
2. формирование «мертвых» зон выдавливаемого материала и срез его по границам этих зон, требующий дополнительных затрат энергии прессования;
3. при прессовании со смазкой – более равномерное по сравнению с начальной стадией распределение смазки по всей поверхности скольжения и вовлечение смазки на поверхность раздела упругой и пластической зоны;
4. холодное упрочнение прессуемого материала с дальнейшим тепловым эффектом деформации, снижающим сопротивление деформации;
5. различные температуры по стенке матрицы;
6. изменение схемы деформации: в начале – схема осадки цилиндрической заготовки, а затем – выдавливание; при этом меняется степень и скорость деформации.

Второй пик связан с изменением схемы деформации и соответствует мертвой зоне.

При использовании фильеров образуются застойные зоны материала в углах между матрицей и контейнером, и при достижении пуансоном застойной зоны она сокращается, что приводит к уменьшению угла скольжения выдавливаемого материала по материалу мертвой зоны (рис. 2).

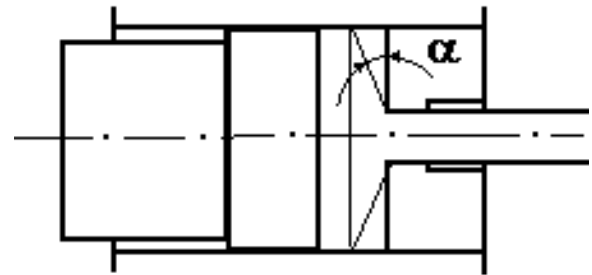


Рис. 2. Уменьшение угла скольжения выдавливаемого материала по материалу «мертвой зоны» при достижении ее пресс-шайбой

Fig. 2. Reducing the sliding angle of the extruded material on the material of the «dead zone» when it reaches the press washer

В настоящее время имеется много работ, посвященных проблеме моделирования процессов прессования (выдавливания) материалов как в холодном, так и в горячем состояниях [17]. Однако, как правило, исследователи используют сложный, громоздкий математический аппарат, исследующий схемы напряженного состояния и не позволяющий в ряде случаев точно учитывать физико-механические характеристики материала. В основном, зависимость сопротивления деформации от таких важных, измеряемых при горячем прессовании технологических параметров, как температура, степень и скорость деформации. Результаты таких теоретических исследований сложно сравнить с результатами экспериментов. По этой причине возникает необходимость использования некоторых эмпирических коэффициентов. Кроме того, сложные модели трудно использовать для прогнозирования параметров прессования в конкретных промышленных условиях.

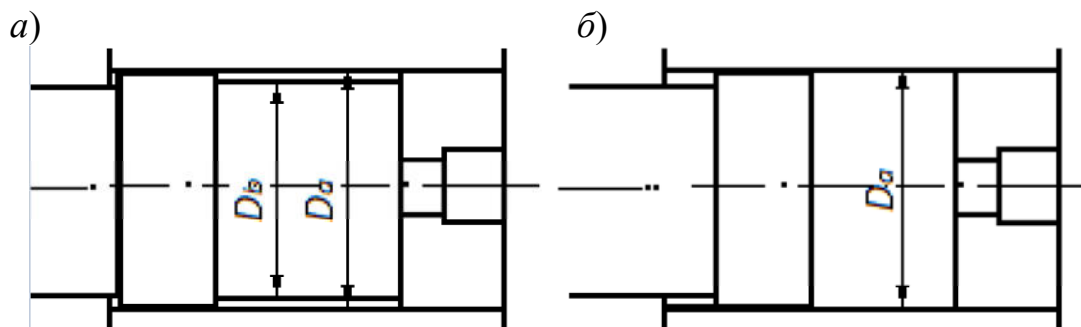


Рис. 3. Первый этап прессования: распрессовка и осадка заготовки до начала истечения материала через матрицу: диаметр заготовки меньше диаметра пресс-блока (а), объем блока заполнен материалом заготовки (б). Пористость заготовки близка к пористости компактного материал

Fig. 3. The first stage of pressing: pressing and settling of the workpiece before the material flows through the matrix: the diameter of the workpiece is less than the diameter of the press block (a), the volume of the block is filled with the workpiece material (b). The porosity of the workpiece is close to the porosity of a compact material

Настоящая работа посвящена созданию математической модели, описывающей типичную кривую прессования (выдавливания) пористой заготовки и основанной на аппроксимации участков подобной экспериментальной кривой классическими зависимостями, описывающими процессы, прохождения которых соответствует участкам этой кривой.

Для рассмотрения и описания процессов при выдавливании, учитывая вид типичной зависимости «усилие – ход пуансона», ход пуансона условно разделен на три участка:

1. Осадка со стартовым пиком.
2. Установившейся этап (стабильное прессование).
3. Конечный этап (нестабильное прессование).

### Экспериментальные результаты

#### 1 участок. Осадка со стартовым пиком

На этом участке начинается осадка заготовки. Диаметр заготовки изменяется от своей величины (до прессования) до диаметра матрицы (рис. 3).

В случае использования пористой заготовки можно предположить, что на первом этапе происходит изменение пористости от

исходной до практически нулевой с дальнейшей деформацией материала как компактного.

Усилие на штампе  $P_{kd}$  рассчитывается по формуле:

$$P_{kd} = \frac{\sigma_s \cdot p \cdot (D_b)^2}{4}, \quad (1)$$

где  $\sigma_s$  – сопротивление деформации,  $D_b$  – диаметр заготовки.

Сопротивление деформации  $\sigma_s$  является функцией температуры, вытяжки и скорости деформации. В данном случае значение этой величины взято на основе литературных данных [19]. При этом для использования в расчётах выбраны экспериментальные данные для простой схемы напряженного состояния-осадки.

Ход ( $T$ ) 1 этапа (длина участка в мм) рассчитан в предположении о том, что он заканчивается при заполнении заготовкой всего объёма блока от пресс-штемпера до матрицы и пористость заготовки достигает значения пористости компактного материала:

$$\frac{L_b \cdot (D_b)^2 \cdot \theta}{4} = \frac{L \cdot (D_a)^2 \cdot \pi}{4}. \quad (2)$$

Откуда:

$$L = L_b \cdot \frac{(D_b)^2 \cdot \theta}{(D_a)^2 \cdot \pi}, \quad (3)$$

где  $L_b$  – длина заготовки,  $D_b$  – диаметр заготовки,  $D_a$  – внешний диаметр матрицы (равен внутреннему контейнера),  $L$  – длина заготовки при окончании 1-го этапа прессования,  $\theta$  – относительная плотность заготовки до начала прессования.

Величина хода осадки:

$$T = L_b - L = L_b - L_b \cdot \frac{(D_b)^2 \cdot \theta}{(D_a)^2}. \quad (4)$$

*Описание стартового усилия.* Предполагается, что на резкое повышение усилия прессования (образование пика) оказывают влияние следующие составляющие:

усилие, расходуемое на деформирование объема материала ( $P_{kd}$ );

усилие на трение по стенкам контейнера ( $P_{kr}$ );

усилие на срез по границам зоны застоя ( $P_{ks}$ ).

При этом предполагается, что срез происходит под углом  $45^\circ$ . Этот угол является для прохождения среза оптимальным, что подтверждается предварительными расчетами, которые были выполнены путём построения зависимости усилия от угла среза. Формируется зона застоя. После начального этапа происходит проникновение смазки со стенок контейнера в пространство между материалом и зоной застоя.

*Расчет стартового усилия*

$$P_{sd} = P_{kd} + P_{kr} + P_{ks}. \quad (5)$$

Здесь:

$$P_{kd} = \frac{\sigma_s \cdot \pi \cdot (D_a)^2}{4}, \quad (6)$$

$$P_{ks} = \frac{\sigma_s \cdot (\sqrt{3})}{2 \cdot F}, \quad (7)$$

где  $\sigma_s \cdot (\sqrt{3}) / 2$  – напряжение среза;  $F$  – площадь поверхности среза по «мертвой зоне».

Поверхность среза представляет собой боковую поверхность усечённого прямого кругового конуса. Площадь этой поверхности равна:

$$F = \frac{\rho \cdot ((D_a)^2 - (D_m)^2)}{(4 \cdot \cos \alpha)}, \quad (8)$$

где  $\alpha$  – угол мертвой зоны,  $D_m$  – внутренний диаметр матрицы (очка).

Величина напряжения среза  $\tau_s$  на поверхности «мертвой» зоны равна:

$$\tau_s = \frac{\sigma_s \cdot (\sqrt{3})}{2 \cdot \sin \alpha}. \quad (9)$$

В итоге:

$$P_{ks} = \frac{\sigma_s \cdot \Psi_k \cdot \pi \cdot (\sqrt{3}) \cdot ((D_a)^2 - (D_m)^2)}{2 \cdot \cos \alpha \cdot 8 \cdot \sin \alpha}, \quad (10)$$

где  $P_{kr}$  – усилие трения о стенки контейнера рассчитывается как:

$$P_{kr} = \sigma_s \cdot \Psi_k \cdot F_a, \quad (11)$$

где  $\Psi_k$  – коэффициент трения, который в настоящей модели принят равным коэффициенту трения скольжения на протяжении всего процесса, за исключением пикового участка, где идет предполагаемый срез материала и  $\Psi_k = 1$ ;  $F_a$  – площадь поверхности трения материала о стенки контейнера:

$$F_a = \pi \cdot D_a \cdot (T_1 - T_2), \quad (12)$$

где  $T_1$  – координата хода пресс-штемпеля, соответствующая концу 1 этапа (осадка + допрессовка) прессования;  $T_2$  – координата пресс-штемпеля, соответствующая началу этапа деформации «мертвой» зоны. Иначе,  $T_2$  – длина «мертвого» угла, равная при его величине  $45^\circ$ :

$$T_2 = \frac{(D_a - D_m)}{2}. \quad (13)$$

**2 участок. Установившийся процесс экструзии.** Как было описано выше, на этом этапе происходит истечение материала через отвер-

стие матрицы. При этом происходит снижение усилия прессования за счет уменьшения поверхности трения о стенки контейнера.

Усилие прессования рассчитывается, как и на стартовом этапе, но коэффициент трения равен не единице (так как считается, что предполагаемый срез материала закончился), а величине коэффициента трения при установившемся процессе скольжения. Данный этап рассчитывается и описывается на протяжении хода пуансона до координаты  $T_2$ , при достижении которой начинается деформация материала «мертвой» зоны.

### 3. Конечный этап прессования. Формирование пресс-остатка

На этом этапе пуансон достигает начала зоны застоя и при этом принимается, что схема деформации будет происходить так, как показано на рис. 2. Это приводит к значительному возрастанию требуемого усилия прессования. Несмотря на некоторое уменьшение площади трения по поверхности зон застоя, происходит увеличение составляющей выдавливания  $P_{ks}$  из-за резкого увеличения угла скольжения.

Конечное усилие  $P_{ek}$ :

$$P_{ek} = P_{kd} + P_{ks}, \quad (14)$$

где  $P_{ks}$  рассчитывается, как и в формуле (10), но необходимо учитывать уменьшение угла «мертвой» зоны:

$$a = a \cdot \operatorname{tg}(a), \quad (15)$$

где  $a = \frac{w}{0,5 \cdot (D_a - D_m)}$ ;  $w$  – координата хода пресс-штемпеля. Она изменяется от  $T_2$  до  $T_{pr}$  – величины заданного пресс-остатка.

Программа для расчета усилия при процессе экструзии составлена с учетом всех вышеописанных предполагаемых зависимостей. Принцип пользования состоит в задании запрашиваемых параметров пресс-оснастки и прессования. Результатом расчета является

выводимый на экран график предполагаемой зависимости типа «усилие прессования – ход пуансона». Диаметр блока в программе не подлежит варьированию и принят равным 110 мм. Также не введено никаких ограничений по уровням вводимых параметров, что предполагает работу с программой пользователя, имеющего представление об описываемом процессе.

Сравнение экспериментальной и теоретической зависимостей усилия выдавливания от хода пуансона было проведено для опытной зависимости усилия прессования порошковых заготовок сплава  $\text{AlSi}_{18}\text{CuMgNi}$  диаметром 107,6 мм и длиной 220 мм при следующих технологических параметрах: диаметр пресс-блока 110 мм, диаметр матрицы 30 мм, величина пресс-остатка 20 мм, температура прессования 420 °С, скорость прессования 2 см/сек. В результате, получена диаграмма прессования в осях «усилие пресса – ход пресс-штемпеля». Эти же параметры были введены в построенную математическую модель. Для выполнения программы требуется введение величины сопротивления деформации, зависящей от скорости и температуры прессования. Эта величина была выбрана на основании экспериментальных данных полученных в [20] и составляет для порошкового сплава  $\text{AlSi}_{18}\text{CuMgNi}$  240 МПа (для перечисленных выше параметров). Представляет сложность выбор коэффициента трения. Поскольку не существует четких зависимостей и рекомендаций для выбора этой величины с учетом всех параметров прессования, она была рассчитана по значениям усилия второго участка экспериментальной кривой прессования по принятой в модели зависимости, описывающей этот участок. Эта величина составляет 0,17 для выбранных условий прессования.

На рис. 4 представлены экспериментальная и смоделированная зависимости с учетом среза на начальной стадии прессования.

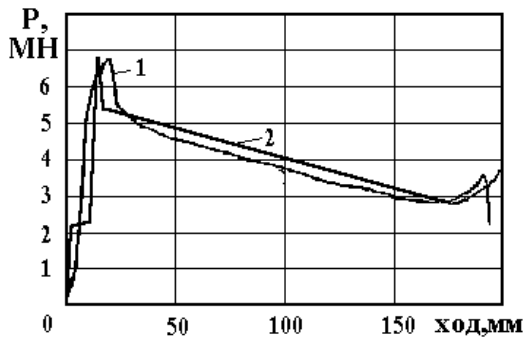


Рис. 4. Сравнение экспериментальной (1) и рассчитанной (2) по предлагаемой модели зависимостей усилия выдавливания при горячей экструзии

Fig. 4. Comparison of the experimental (1) and calculated (2) according to the proposed model of dependences of the extrusion force during hot extrusion

При наложении кривых зависимостей, полученных опытным путем и при помощи моделирования, выявлен близкий характер их поведения. Наибольший интерес представляет совпадение абсолютных значений величин усилия на начальном этапе прессования, что свидетельствует о правомерности предположения причины наличия стартового пика из-за образования «мертвой зоны».

### Заключение

Разработан алгоритм расчета усилия экструзии на протяжении процесса прессования бри-

кетов порошка алюминия. Алгоритм позволяет предварительно определить энергосиловые параметры процесса, особенно на начальном этапе, — усилие, мощность, скорость.

Исходными параметрами для расчетов являются:

характеристики материала: плотность брикета (насыпная плотность), размеры брикета; степень деформации (вытяжки), сопротивление деформации в зависимости от скорости деформации и температуры;

геометрические и скоростные параметры процесса: вид прессования (прямое или обратное), размеры прессовой оснастки (длина, диаметр), размеры матрицы (вплоть до размеров калибрующего пояса), коэффициент трения (учет смазки для прессования), скорость движения пресс-блока.

Показано, что наличие нестационарных участков прессования и зависимость сопротивления от скорости деформации приводят к неустойчивости процесса, а соответственно, к неравномерности свойств получаемых прутков. Однако представленный алгоритм позволяет рассчитать и снизить этот отрицательный эффект при применении систем автоматизации (стабилизирующих систем скорости-усилие) с соответствующей регулировкой.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Рудской А.И., Волков К.Н., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А. Физические процессы и технологии получения металлических порошков из расплава. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. 610 с.
- [2] 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.
- [3] Доан Ван Фук, Цеменко В.Н., Ганин С.В. Моделирование процесса осадки порошкового материала в оболочке // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2015. 3 (226). С. 30–39. DOI: 10.5862/JEST.226.4
- [4] Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А. Новый подход к синтезу порошковых и композиционных материалов электронным лучом. Ч. 1. Технологические особенности процесса // Металловедение и термическая обработка металлов. 2016. № 1 (727). С. 30–35.
- [5] Кокорин В.Н., Рудской А.И., Филимонов В.И., Бульжев Е.М., Кондратьев С.Ю. Теория и практика процесса прессования гетерофазных увлажненных механических смесей на основе железа. Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2012. 236 с.
- [6] Демьянов Г.В., Григорьев А.А., Шалашов Е.В. Экранирование от ионизирующего излучения модулями на основе реакторного графита, порошка обедненного урана и компактного алюминия // Неделя науки СПбПУ: матер. науч. конф. с междунар. участием, лучшие доклады. СПб., 2019. С. 113–116.
- [7] Кондратьев С.Ю., Пташник А.В., Анастасидади Г.П., Петров С.Н. Анализ превращений карбидных фаз в сплаве 25Cr35Ni методом количественной элек-

тронной микроскопии // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2015. № 7 (721). С. 36–43.

[8] **Цеменко В.Н.** Деформирование порошковых сред. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2001. 104 с.

[9] **Рудской А.И., Белов И.М., Гордеев С.К., Барзинский О.В., Кондратьев С.Ю.** Углеродные наноструктурные имплантаты для замещения костных дефектов и технология их изготовления // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2018. № 1 (751). С. 20–25.

[10] **Кокорин В.Н., Филимонов В.И., Григорьев А.А., Сизов Н.А., Кокорин А.В.** Теоретические исследования процесса интенсивного уплотнения гетерофазных механических смесей // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2014. № 11 (119). С. 3–7.

[11] Способ получения защитной оксидной пленки на металлической поверхности / **Кокорин В.Н., Кокорин А.В., Кокорин М.В., Григорьев А.А., Мертенс К.К.** // Патент на изобретение RU 2638869 11.10.2016.

[12] **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 // *Научные технологии в машиностроении*. 2013. № 5 (23). С. 13–20.

[13] **Рудской А.И., Григорьев А.А.** Уплотнение пористой упругопластической заготовки при обработке давлением // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 1984. № 9. С. 78–82.

[14] **Кондратьев С.Ю., Горьнин В.И., Попов В.О.** Оптимизация параметров поверхностно-упрочненного

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

[15] **Григорьев А.А.** Разработка технологии получения заготовок электродов для машин контактной сварки на основе порошковой композиции  $\text{Cu}_2\text{O}_3$  // *Металлообработка*. 2009. № 4 (52). С. 32–34.

[16] **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.

[17] **Котов С.А., Музафарова С.-В.Р., Батурова Л.П., Береснева Ю.С.** Оценка методов формирования порошков терморасширенного графита с различными исходными свойствами // *Современные материалы и передовые производственные технологии (СМПТТ-2019): тез. докл. Междунар. науч. конф.*, 2019. С. 57.

[18] **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.

[19] **Ганин С.В., Замоздра М.Ю., Цеменко В.Н.** Определение реологических характеристик и моделирование процесса экструзии порошковых материалов // *Современные материалы и передовые производственные технологии (СМПТТ-2019): тез. докл. Междунар. науч. конф.*, 2019. С. 97.

[20] **Гоппиенко В.Г., Смагоринский М.Е., Григорьев А.А. [и др.]** Спеченные материалы из алюминиевых порошков / Под ред. Смагоринского М.Е. М.: Металлургия, 1993. 320 с.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ГРИГОРЬЕВ Андрей Анатольевич** – кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

E-mail: zhurnal-grig.2020@yandex.ru

**ДМИТРИЮК Артём Игоревич** – инженер Концерна «Росэнергоатом», Ленинградская АЭС

E-mail: kral27@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 23.03.2020

## REFERENCES

[1] **A.I. Rudskoy, K.N. Volkov, S.Yu. Kondratyev, Yu.A. Sokolov**, Fizicheskiye protsessy i tekhnologii polucheniya metallicheskih poroshkov iz rasplava. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2018.

[2] **Yu.A. Sokolov, S.Yu. Kondratyev, A.A. Lukyanov**, Polucheniye izdeliy iz kompozitsionnykh materialov metodom elektronno-luchevogo sinteza i issledovaniye

ikh svoystv, Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyenii, 2 (2015) 35–41.

[3] **Doan Van Fuk, V.N. Tsemenko, S.V. Ganin**, Modelirovaniye protsessa osadki poroshkovogo materiala v obolochke, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 3 (226) (2015) 30–39. DOI: 10.5862/JEST.226.4



- [4] **A.I. Rudskoy, S.Yu. Kondratyev, Yu.A. Sokolov**, Novyy podkhod k sintezu poroshkovykh i kompozitsionnykh materialov elektronnykh luchom. Ch. 1. Tekhnologicheskiye osobennosti protsessa, Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov, 1 (727) (2016) 30–35.
- [5] **V.N. Kokorin, A.I. Rudskoy, V.I. Filimonov, Ye.M. Bulzhev, S.Yu. Kondratyev**, Teoriya i praktika protsessa pressovaniya geterofaznykh uvlazhnennykh mekhanicheskikh smesey na osnove zheleza. Ulyanovsk: Izd-vo UIGTU, 2012.
- [6] **G.V. Demyanov, A.A. Grigoryev, Ye.V. Shalashov**, Ekranirovaniye ot ioniziruyushchego izlucheniya modulyami na osnove reaktornogo grafita, poroshka obednennogo urana i kompaktnogo alyuminiya, Nedelya nauki SPbPU. Materialy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem, luchshiye doklady. Sankt-Peterburg, (2019) 113–116.
- [7] **S.Yu. Kondratyev, A.V. Ptashnik, G.P. Anastasiadi, S.N. Petrov**, Analiz prevrashcheniy karbidnykh faz v splave 25Cr35Ni metodom kolichestvennoy elektronnoy mikroskopii, Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov, 7 (721) (2015) 36–43.
- [8] **V.N. Tsemenko**, Deformirovaniye poroshkovykh sred. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2001.
- [9] **A.I. Rudskoy, I.M. Belov, S.K. Gordeyev, O.V. Barzinskiy, S.Yu. Kondratyev**, Uglerodnyye nanostrukturnyye implantaty dlya zameshcheniya kostnykh defektov i tekhnologiya ikh izgotovleniya, Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov, 1 (751) (2018) 20–25.
- [10] **V.N. Kokorin, V.I. Filimonov, A.A. Grigoryev, N.A. Sizov, A.V. Kokorin**, Teoreticheskiye issledovaniya protsessa intensivnogo uplotneniya geterofaznykh mekhanicheskikh smesey, Uprochnyayushchiye tekhnologii i pokrytiya, 11 (119) (2014) 3–7.
- [11] Sposob polucheniya zashchitnoy oksidnoy plenki na metallicheskoj poverkhnosti / Kokorin V.N., Kokorin A.V., Kokorin M.V., Grigoryev A.A., Mertens K.K., Patent na izobreteniyе RUS 2638869 11.10.2016.
- [12] **A.I. Rudskoy, V.N. Kokorin, S.Yu. Kondratyev, V.I. Filimonov, A.V. Kokorin**, Pressovaniye geterofaznykh uvlazhnennykh zheleznykh poroshkov pri ispolzovanii metoda intensivnogo uplotneniya, Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii, 5 (23) (2013) 13–20.
- [13] **A.I. Rudskoy, A.A. Grigoryev**, Uplotneniye poristoy uprugoplasticheskoy zagotovki pri obrabotke davleniyem, Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy, Chernaya metallurgiya, 9 (1984) 78–82.
- [14] **S.Yu. Kondratyev, V.I. Gorynin, V.O. Popov**, Optimizatsiya parametrov poverkhnostno-uprochnennogo sloya pri lazernoy zakalke detaley, Svarochnoye proizvodstvo, 3 (2011) 11–15.
- [15] **A.A. Grigoryev**, Razrabotka tekhnologii polucheniya zagotovok elektrodov dlya mashin kontaktnoy svarki na osnove poroshkovoy kompozitsii  $\text{Cu}_2\text{O}_3$ , Metalloobrabotka, 4 (52) (2009) 32–34.
- [16] **A.I. Rudskoy, S.Yu. Kondratyev, Yu.A. Sokolov, V.N. Kopayev**, Osobennosti modelirovaniya protsessa posloynogo sinteza izdeliy elektronnykh luchom, Zhurnal tekhnicheskoy fiziki, 85 (11) (2015) 91–96.
- [17] **S.A. Kotov, S.-V.R. Muzafarova, L.P. Baturova, Yu.S. Beresneva**, Otsenka metodov formovaniya poroshkov termorasshirennoy grafita s razlichnymi iskhodnymi svoystvami, V kn.: Sovremennyye materialy i peredovyye proizvodstvennyye tekhnologii (SMPPT–2019). Tezisy dokladov mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, (2019) 57.
- [18] **A.I. Rudskoy, S.Yu. Kondratyev, Yu.A. Sokolov**, Algoritm i tekhnologicheskiye protsessy sinteza poroshkovykh detaley elektronnykh luchom v vakuume, Tekhnologiya mashinostroyeniya, 1 (2015) 11–16.
- [19] **S.V. Ganin, M.Yu. Zamozdra, V.N. Tsemenko**, Opredeleniye reologicheskikh kharakteristik i modelirovaniye protsessa ekstruzii poroshkovykh materialov, Sovremennyye materialy i peredovyye proizvodstvennyye tekhnologii (SMPPT–2019). Tezisy dokladov mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, (2019) 97.
- [20] **V.G. Gopiyenko, M.Ye. Smagorinskiy, A.A. Grigoryev idr.**, Spechennyye materialy iz alyuminiyevykh poroshkov / Pod red. Smagorinskogo M.Ye. M.: Metallurgiya, 1993.

#### THE AUTHORS

**GRIGORIEV Andrei A.** – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: zhurnal-grig.2020@yandex.ru

**DMITRYUK Artem I.** – *Rosenergoatom, Leningradskaya AES*

E-mail: kral27@mail.ru

Received: 23.03.2020