

DOI 10.8562/JEST.214.14
УДК 621.762

А.И. Рудской, Ю.А. Соколов, В.Н. Копаев

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ГРАНУЛ МЕТОДОМ PREP

A.I. Rudskoi, Yu.A. Sokolov, V.N. Kopayev

SPECIFICS OF MODELLING OF THE PROCESS OF RECEIVING GRANULES BY PREP METHOD

В статье выполнено моделирование процесса получения гранул на специализированной промышленной технологической установке. Установка оснащена камерой распыления, механизмом вращения электрода, узлом подачи газовой смеси, источником плазменного нагрева, системой водяного охлаждения стенок камеры. Использован метод вращающегося электрода с плазменным нагревом (PREP). В этом методе вращающийся электрод подается в камеру распыления, где в результате оплавления плазменной дугой на торце электрода образуется жидкая пленка металла. Разработана математическая модель процесса, включающая все технологические операции. Показано, что численное моделирование процесса охлаждения частиц распыленного металла в газовой среде позволяет прогнозировать важнейшие параметры процесса и выбирать наиболее выгодные значения параметров оборудования.

ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ; КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ; ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СИНТЕЗ; МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ; ГРАНУЛЫ; МЕТОД PREP; ТЕПЛО- МАССОПЕРЕНОС; ГАЗОВАЯ СРЕДА.

Modeling of the process of receiving granules by using of specialized industrial technological plant is demonstrated in the article. The plant is equipped with a dispersion camera, an electrode rotation mechanism, a knot of the gas mix supply, a source of plasma heating, a system of water cooling of the camera walls. The method of the rotating electrode with plasma heating (PREP) is used. By this method the rotating electrode moves in the dispersion camera where, as a result of melting by the plasma arch, a liquid film of metal forms at an end face of the electrode. The mathematical model of the process with all the technological operations is developed. It is shown that numerical modeling of the process of cooling of the sprayed metal particles in the gas environment allows to predict the most important parameters of process and to choose the most favorable values of the equipment parameters.

POWDER METALLURGY, COMPOSITE MATERIALS, ELECTRON BEAM SYNTHESIS, MATHEMATICAL MODELLING, GRANULES, METHOD PREP, HEAT- MASS TRANSFER, GAS ENVIRONMENT.

Введение

В порошковой металлургии уже применяются или проходят апробацию в промышленности различные технологии получения готовых изделий [1–4]. Одной из наиболее перспективных является технология синтеза изделий электронным лучом (СИЭЛ) [5–7], а также формирования на таких деталях поверхностных покрытий

с повышенными эксплуатационными свойствами [8, 9]. Эти методы открывают новые возможности по получению изделий из порошка различного химического состава с программируемой структурой [10]. Важная технологическая операция в этом методе — процесс получения гранул требуемых размеров, формы и химического состава [11].

Цель нашей работы — моделирование процесса получения гранул на специализированной технологической установке, оснащенной камерой распыления, механизмом вращения электрода, узлом подачи газовой смеси, источником плазменного нагрева, системой водяного охлаждения стенок камеры. Используется метод вращающегося электрода с плазменным нагревом (PREP): вращающийся электрод подается в камеру распыления, где в результате оплавления плазменной дугой на торце электрода образуется жидкая пленка металла.

Условия и методика моделирования

Особенности модели

Важным преимуществом метода PREP является получение плотных безгазовых частиц сферической формы. Механизм каплеобразования, описанный в работе [12], включает: формирование тонкой пленки расплавленного металла размером 20–50 мкм на торце электрода вследствие воздействия плазмы; движение жидкого металла к периферийной области электрода и образование венца; перетекание расплава в сформировавшиеся на венце сферические головки; отрыв частиц от венца, когда сил центробежного ускорения превышают силы поверхностного натяжения.

Описанный механизм показывает, что на первом этапе — этапе формирования частицы до момента отделения от венца — практически отсутствует ее взаимодействие с газовой средой. Следовательно, исключается получение частиц с газовыми и прочими включениями. Охлажде-

ние и кристаллизация в смеси инертных газов происходит на втором этапе. Более того, при скоростях кристаллизации свыше 10^3 – 10^4 °C/с образуются частицы с мелкозернистой структурой. При переходе к более высоким скоростям охлаждения размеры элементов микроструктуры уменьшаются, что связано с изменением условий роста кристаллов.

При отрыве частицы от венца на нее действуют две силы: удерживающая сила натяжения $F_{нат}$ на перемычке размером ηd_q ($\eta = 0,8$ – $1,0$) и отрывающая центробежная сила $F_{ц}$ [12] (рис. 1). Массу частицы, оторвавшейся от венца, можно определить по следующей формуле:

$$m_q = \pi \rho_q d_q^3 / 6, \quad (1)$$

где m_q — масса частицы; ρ_q — плотность частицы; d_q — диаметр частицы.

Для отрыва частицы необходимо выполнение условия

$$F_{ц} \geq F_{нат}. \quad (2)$$

Определим силу натяжения:

$$F_{нат} = \sigma(T) \pi \eta d_q, \quad (3)$$

где $\sigma(T)$ — коэффициент поверхностного натяжения расплава.

Коэффициент поверхностного натяжения частицы $\sigma(T)$ равен работе, необходимой для увеличения поверхности жидкости на единицу площади при постоянной температуре. Коэффициент $\sigma(T)$ зависит от свойств расплава и охлаждаемой среды. При моделировании желательно учитывать зависимость σ от температуры, которую можно определить, пользуясь следующей формулой [13]:

$$d\sigma/dT = -B(\rho/\mu_M)^{2/3}, \quad (4)$$

где T — температура; μ_M — молекулярная масса; B — постоянная [$2,1 \text{ г см}^2/(\text{с } ^\circ\text{C})$].

Сила центробежного ускорения описывается формулой

$$F_{ц} = m_q a_{ц}, \quad (5)$$

где $a_{ц}$ — центробежное ускорение, равное

$$a_{ц} = V_3^2 / R_3 = 2V_3^2 / D_3, \quad (6)$$

где R_3 , D_3 — радиус и диаметр заготовки; V_3 — линейная скорость вращающейся заготовки.

Линейная скорость вращения заготовки связана с угловой следующей зависимостью:

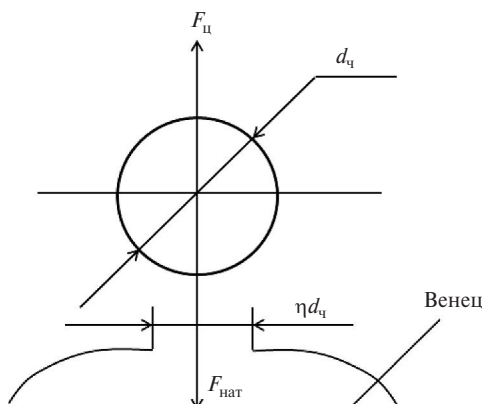


Рис. 1. Схема образования частицы в методе PREP

$$V_3 = R_3 \omega, \quad (7)$$

где ω — угловая скорость.

После ряда подстановок получаем

$$F_{ц} = \pi \rho_{ч} d_{ч}^3 R_3 \omega^2 / 6. \quad (8)$$

Условие отрыва частицы можно представить в следующем виде:

$$\pi \rho_{ч} d_{ч}^3 R_3 \omega^2 / 6 \geq \sigma \pi d_{ч}, \quad (9)$$

или

$$\omega^2 \geq 6\sigma\eta / (\rho_{ч} d_{ч}^2 R_3). \quad (10)$$

Отсюда

$$\omega \geq \left(\frac{6\sigma\eta}{\rho_{ч} R_3} \right)^{0,5} / d_{ч}. \quad (11)$$

Для получения частиц диаметром $d_{ч}$ необходима частота вращения заготовки n , удовлетворяющая следующему неравенству:

$$n \geq 23,39 \left(\frac{6\sigma\eta}{\rho_{ч} R_3} \right)^{0,5} / d_{ч}. \quad (12)$$

Таким образом, при заданной частоте вращения заготовки можно прогнозировать диаметр получаемых частиц:

$$d_{ч} \geq 23,39 \left(\frac{6\sigma\eta}{\rho_{ч} R_3} \right)^{0,5} / n. \quad (13)$$

Полученные формулы (12) и (13) позволяют в зависимости от подхода определить частоту вращения заготовки при заданном диаметре или, наоборот, прогнозировать диаметр частиц при заданной частоте вращения заготовки.

Отвод тепла с поверхности летящей частицы в вакуумном пространстве осуществляется излучением, длина полета частицы при этом не зависит от ее размера и может составлять несколько метров. Более интенсивная теплопередача происходит при дополнительном конвективном охлаждении капли в потоке смеси инертных газов (аргон и гелий). В этом случае длина полета частицы, регулируемая расходом инертного газа и расположением распределителя охлаждающего газа в плавильной камере, существенно уменьшается.

В процессе охлаждения частицы теплопередача путем принудительной конвекции примерно на два порядка превосходит потери тепла за счет излучения. Важнейшими параметрами, влияющими на скорость охлаждения частицы, являются диаметр частицы, теплопроводность газа, разность температур между частицей и газом.

Средний по поверхности коэффициент α теплоотдачи от шара, обтекаемого потоком теплоносителя, можно рассчитать по формуле [14]

$$Nu = 2 + 0,03Re^{0,54}Pr^{0,33} + 0,35Re^{0,58}Pr^{0,36}, \quad (14)$$

где Re — число Рейнольдса, Nu — число Нуссельта, Pr — число Прандтля.

Число Нуссельта, определяющее интенсивность конвективного теплообмена между поверхностью частицы и потоком газа, можно представить в следующем виде [14]:

$$Nu = \alpha d_{ч} / \lambda, \quad (15)$$

где α — коэффициент теплоотдачи от частицы к газу, Вт/м²/К; $d_{ч}$ — диаметр частицы, м; λ — коэффициент теплопроводности газовой среды, Вт/м/К.

Формула для расчета числа Прандтля имеет следующий вид [15]:

$$Pr = \nu / a, \quad (16)$$

где a , ν — коэффициенты температуропроводности и кинематической вязкости газовой смеси, м²/с.

Для более интенсивного отвода тепла от частицы, помимо охлаждения излучением, используется конвективное охлаждение в потоке смеси инертных газов (аргон и гелий). Процентный состав смеси определяется технологией и свойствами инертных газов:

гелий имеет на порядок большую теплопроводность, чем аргон, что обеспечивает большие скорости охлаждения частиц;

аргон имеет большую плотность, чем гелий, что увеличивает время полета частицы в камере, отчасти компенсируя меньшую теплопроводность аргона, который, имея меньший потенциал ионизации, чем гелий, также обеспечивает устойчивость дугового разряда.

Исходные данные модели

Задачей моделирования является исследование скорости движения газовой смеси в камере распыления и режимов охлаждения стенок камеры.

Газовая смесь подается в камеру распыления через отверстие диаметром 140 мм, расположенное соосно с электродом (рис. 2, а). Через это же

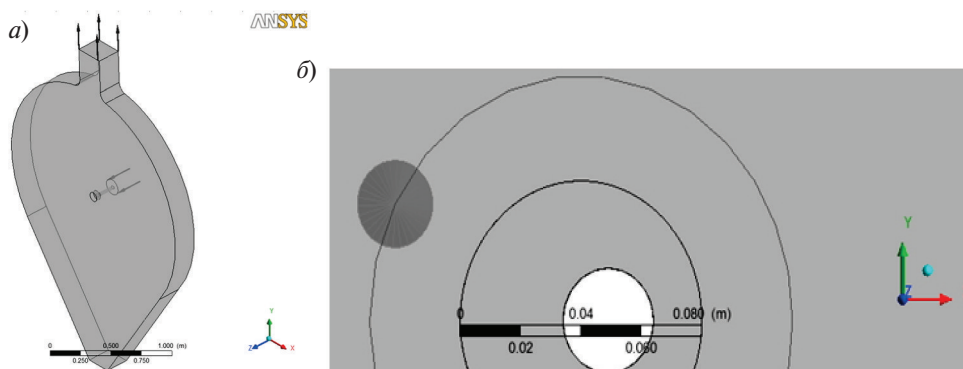


Рис. 2. Исходная геометрическая модель технологической установки для получения гранул методом PREP: *a* — отверстие для подачи газовой смеси; *б* — схема подачи факела плазмы на торец электрода

отверстие факел плазмы подается на торец электрода с эксцентриситетом 20 мм (рис. 2, б).

В принятой модели химический состав газовой среды составляет 90 % гелия и 10 % аргона, что обеспечивает наиболее благоприятный режим охлаждения частиц и устойчивость дугового разряда плазмы.

Принимаем следующие значения исходных параметров модели: избыточное давление в камере $P = 131723$ Па; температура плазменного факела $T_{пл} = 3000$ °С; температура электрода $T_{эл} = 1600$ °С; расход газовой смеси $Q_{газ} = 19 \cdot 10^{-3}$ м³/с; температура газовой смеси на входе $T_{вх} = 40$ °С; зазор между плазматроном и электродом $\Delta = 20$ мм; диаметр факела плазмы $D_{пл} = 30$ мм; частота вращения электрода $n = 15000$ об/мин.

В основу решения задачи в рамках программного комплекса ANSYS CFX положен алгоритм, суть которого заключается в раздельном решении для каждой степени свободы (температура, давление, скорость) системы матриц, полученных конечно-элементной дискретизацией системы дифференциальных уравнений [16, 17]. Цель расчета — получить распределения температуры, давления, скорости в процессе полета частицы. Предполагается, что теплообмен между поверхностью частицы и газом осуществляется путем конвекции и лучистым переносом. Частица сферической формы, обладающая высокой начальной скоростью, движется в газовой среде.

Результаты численного моделирования

Математическая модель процесса получения гранул методом PREP имеет важное прикладное значение, так как позволяет анализировать процесс при различных значениях исходных данных. Поле скоростей газовой смеси в камере распыления представлено на рис. 3.

Распределение коэффициентов теплоотдачи от источников тепла к газовой смеси около поверхности электрода и в области стенки камеры распыления во время процесса охлаждения частиц приведено соответственно на рис. 4, *a* и рис. 4, *б*.

Скорость охлаждения при кристаллизации частиц определяет структурные параметры гранулы — величину зерна, расстояние между ветвями дендритов, величину частиц вторичных фаз [12]. Знание скорости охлаждения помогает выбирать оптимальные значения конструктивных параметров специализированного оборудования (диаметр камеры распыления, расположение

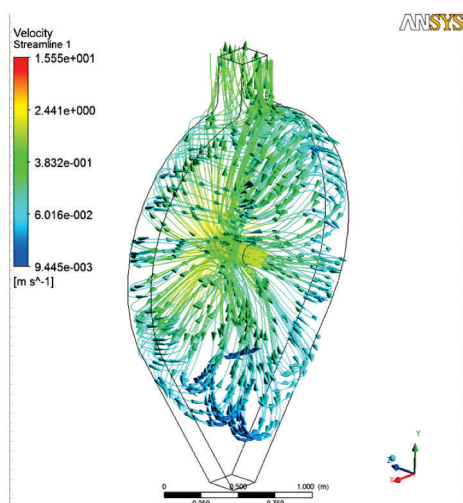


Рис. 3. Поле скоростей газовой смеси в камере распыления по методу PREP

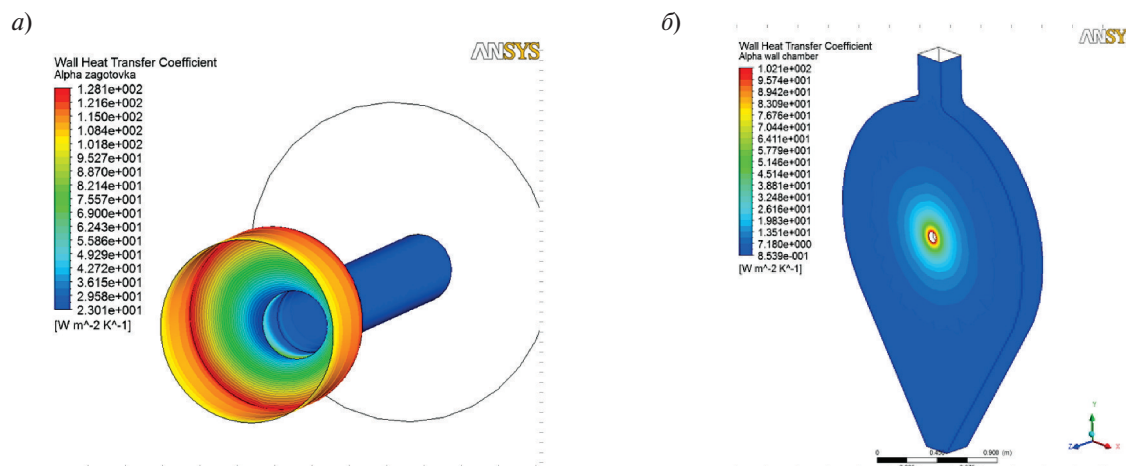


Рис. 4. Распределение коэффициентов теплоотдачи около поверхности электрода (а) и в области стенки камеры распыления (б)

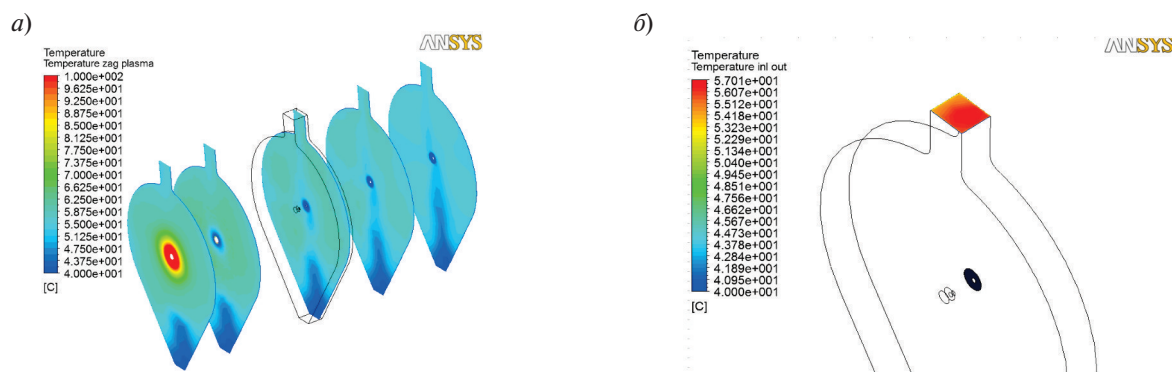


Рис. 5. Температурное поле в камере распыления (а) и выходном патрубке газовой смеси (б)

спреера для организации дополнительного конвективного охлаждения, диаметр форсунок и проч.), а также химический состав и температуру газовой смеси на входе, определяемую мощностью холодильного агрегата.

Температурное поле в камере распыления приведено на рис. 5, а, на выходном патрубке газа — на рис. 5, б.

Разработанная численная математическая модель позволяет прогнозировать важнейшие параметры процесса получения гранул методом PREP: поле скоростей газовой смеси; распределение коэффициентов теплоотдачи от источников тепла к газовой смеси; температурное поле газовой смеси.

Выводы

Разработана математическая модель, позволяющая конструкторам промышленного оборудования и технологам принимать обоснованные решения при назначении геометрических раз-

меров на этапе проектирования специализированного технологического оборудования и выбирать оптимальный режим охлаждения стенок камеры распыления при получении гранул методом вращающегося электрода с плазменным нагревом (PREP).

На основе расчета технологических параметров (температура, скорость газовой смеси) процесса получения гранул методом PREP можно обосновывать введение в конструкцию технологических установок дополнительных устройств охлаждения частиц с целью получения необходимой структуры и свойств гранул.

Численное моделирование процесса охлаждения частиц распыленного металла в газовой среде позволяет прогнозировать и рассчитывать важнейшие параметры технологического процесса получения гранул методом PREP и выбирать наиболее выгодные для промышленной реализации значения параметров оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Либенсон Г.А., Лопатин В.Ю., Комарницкий Г.В.** Процессы порошковой металлургии. В 2-х томах. Т. 1. Производство металлических порошков. М.: Изд-во МИСИС, 2001. 368 с.
2. **Либенсон Г.А., Лопатин В.Ю., Комарницкий Г.В.** Процессы порошковой металлургии. В 2-х томах. Т.2. Формование и спекание. М.: Изд-во МИСИС, 2002. 320 с.
3. **Герман Рендалл М.** Порошковая металлургия от А до Я. Учебно-справочное руководство / Пер. с англ. О.В. Падалко и Г.А. Либенсон. М.: ИД Интеллект, 2009. 336 с.
4. **Кокорин В.Н., Рудской А.И., Филимонов В.И., Булыжев Е.М., Кондратьев С.Ю.** Теория и практика процесса прессования гетерофазных увлажненных механических смесей на основе железа. Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2012. 236 с.
5. **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.
6. **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 // *Наукоемкие технологии в машиностроении*. 2013. № 5 (23). С. 13–20.
7. **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. № 3 (178). С. 148–155.
8. **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*. August 2012. Vol. 26, № 8. P. 629–632.
9. **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.
10. **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.
11. **Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А., Копаев В.Н.** Исследование движения расплавленной гранулы по поверхности формируемого изделия в процессе электронно-лучевого синтеза изделий // *Металлообработка*. 2014. № 1 (79). С. 27–31.
12. **Мусиенко В.Т.** Закономерности образования гранул при центробежном распылении вращающейся заготовки. В кн.: *Металлургия гранул*. М.: Изд-во ВИЛС, 1983. Вып. 1. С. 41–48.
13. *Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. И.К. Кикоина*. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
14. **Орлов В.К.** К расчету скоростей охлаждения капель распыленного металла в газовой среде. В кн.: *Металлургия гранул*. М.: Изд-во ВИЛС, 1983. Вып. 1. С. 67–77.
15. **Ландау Л.Д., Лифшиц Б.М.** Гидродинамика. Теоретическая физика: Т. VI: М.: Наука, 1986. 736 с.
16. *ANSYS Basic Analysis Procedures Guide: ANSYS Realise 5.6 / ANSYS Inc*, 1998.
17. **Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А.** ANSYS в руках инженера: практическое руководство. М.: Едиториал УРСС, 2003. 272 с.

REFERENCES

1. **Libenson G.A., Lopatin V.Iu., Komarnitskii G.V.** Protsessy poroshkovoy metallurgii [Powder metallurgy process]. V 2-kh tomakh. T. 1. Proizvodstvo metallicheskikh poroshkov. M.: MISIS, 2001. 368 s. (rus.)
2. **Libenson G.A., Lopatin V.Iu., Komarnitskiy G.V.** Protsessy poroshkovoy metallurgii [Powder metallurgy process]. V 2-kh tomakh. T.2. Formovaniye i spekaniye. Moskva: MISIS, 2002. 320 s. (rus.)
3. **German Rendall M.** Poroshkovaya metallurgiya ot A do Ya [Powder metallurgy from A to Z]. Uchebno-spravochnoye rukovodstvo / Per. s angl. O.V. Padalko i G.A. Libenson. Moskva: ID Intellect, 2009. 336 s. (rus.)
4. **Kokorin V.N., Rudskoy A.I., Filimonov V.I., Bulyzhev Ie.M., Kondratyev S.Iu.** Teoriya i praktika protsesa pressovaniya geterofaznykh uvlazhnennykh mekhanicheskikh smesey na osnove zheleza [Theory and practice of pressing process heterophase moist mechanical mixtures based on iron]. Ulyanovsk: UIGTU, 2012. 236 s. (rus.)
5. **Rudskoy A.I., Kondratyev S.Iu., Kokorin V.N.** Pressovaniye geterofaznykh uvlazhnennykh poroshkovykh metallicheskikh smesey dlya povysheniya kachestva vysokoplotnykh zagotovok s ispolzovaniyem metoda intensivnogo uplotneniya [Pressing heterophase moist powder metal mixtures to improve the quality of high density articles using the method of intensive compaction]. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal*. 2011. № 6. S. 12–16. (rus.)
6. **Rudskoy A.I., Kokorin V.N., Kondratyev S.Iu., Filimonov V.I., Kokorin A.V.** Pressovaniye geterofaznykh uvlazhnennykh zheleznykh poroshkov pri ispolzovanii metoda intensivnogo uplotneniya [Pressing heterophase moist iron powders using the method of intensive compaction]. *Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii*. 2013. № 5 (23). S. 13–20. (rus.)

7. **Rudskoy A.I., Kondratyev S.Iu., Kokorin V.N., Sizov N.A.** Issledovaniye protsessa uplotneniya pri ultrazvukovom vozdeystvii na uvlazhnennuyu poroshkovuyu sredu [Study the compaction process ultrasonic treatment on damp powder environment]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2013. № 3 (178). S. 148–155. (rus.)
8. **Kondrat'ev S.Iu., Gorynin V.I., Popov V.O.** Optimization of the parameters of the surface-hardened layer in laser quenching of components. *Welding International*. August 2012. Vol. 26, № 8. S. 629–632. (rus.)
9. **Kondratyev S.Iu., Gorynin V.I., Popov V.O.** Optimizatsiya parametrov poverkhnostno-uprochnennogo sloya pri lazernoy zakalke detaley [Optimization of parameters of surface-hardened layer in the laser hardening components]. *Svarochnoye proizvodstvo*. 2011. № 3. S. 11–15. (rus.)
10. **Rudskoy A.I., Kondratyev S.Iu., Sokolov Iu.A.** Tekhnologiya posloynogo elektronno-luchevogo sinteza poroshkovykh izdeliy v vakuume [Technology layered electron-beam synthesis of powder products in vacuum]. *Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyenii*. 2014. № 8. S. 40–45. (rus.)
11. **Kondratyev S.Iu., Sokolov Yu.A., Kopayev V.N.** Issledovaniye dvizheniya rasplavlennoy granuly po poverkhnosti formiruyemogo izdeliya v protsesse elektronno-luchevogo sinteza izdeliy. [Motion Study melt granules formed on the surface of the product in the process of electron-beam synthesis products]. *Metalloobrabotka*. 2014. № 1 (79). S. 27–31. (rus.)
12. **Musiyenko V.T.** Zakonomernosti obrazovaniya granul pri tsentrobezhnom raspylenii vrashchayushcheyasya zagotovki [Of the formation of granules at a centrifugal spray rotating workpiece]. *Metallurgiya granul*. Vyp. 1. M.: Izd-vo VILS, 1983. S. 41–48. (rus.)
13. Tablitsy fizicheskikh velichin [Tables of physical quantities. Directory]: Spravochnik / Pod red. I.K. Kikoina. M.: Atomizdat, 1976. 1008 s. (rus.)
14. **Orlov V.K.** K raschetu skorostey okhlazhdeniya kapel raspylennoy metalla v gazovoy srede [Calculation of cooling rates atomized metal droplets in a gas medium]. *Metallurgiya granul*. Vyp. 1. M.: Izd-vo VILS, 1983. S. 67–77. (rus.)
15. **Landau L.D., Lifshits B.M.** Gidrodinamika. Teoreticheskaya fizika [Hydrodynamics. Theoretical physics]. T. VI. M.: Nauka, 1986. 736 s. (rus.)
16. ANSYS Basic Analysis Procedures Guide / ANSYS Realise 5.6 / ANSYS Inc, 1998. (rus.)
17. **Kaplun A.B., Morozov Ye.M., Olferyeva M.A.** ANSYS v rukakh inzhenera: prakticheskoye rukovodstvo [ANSYS in the hands of the engineer: a practical guide]. M.: Yeditorial URSS, 2003. 272 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

AUTHORS

- RUDSKOI Andrey I.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: rector@spbstu.ru
- SOKOLOV Yuri A.** — «Electromechanica». 2, Zavodskoe shosse, Rzhev city Tver region, Russia, 172386. E-mail: s5577@inbox.ru
- KOPAEV Vladimir N.** «Electromechanica». 2, Zavodskoe shosse, Rzhev city Tver region, Russia, 172386. E-mail: vkopaev_ela@mail.ru