

DOI: 10.15593/2224-9877/2016.4.04

УДК 621.74.045:53.09

С.Г. Жилин, О.Н. Комаров, Д.А. Потянихин, А.А. СоснинИнститут машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения РАН,
Комсомольск-на-Амуре, Россия**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛОГАРИФМИЧЕСКОГО
УРАВНЕНИЯ ПРЕССОВАНИЯ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССА
ОДНООСНОГО УПЛОТНЕНИЯ ПОРОШКОВОГО ТЕЛА
ИЗ ПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА**

Выплавляемые модели широко используются в специальных видах литья. Традиционно выплавляемые модели получают заливкой жидкого либо запрессовкой пастообразного модельного материала в пресс-форму. Однако такой способ нередко приводит к появлению усадочных раковин, нарушению размеров и геометрии выплавляемых моделей. Экспериментально установлено, что получение выплавляемых моделей прессованием порошков полимерных композиций повышает размерную и геометрическую точность отливок. Технологически целесообразная плотность таких прессовок составляет 88–92 % от плотности полимерного компонента в «литом» состоянии. В ряде случаев для выплавляемых моделей, полученных прессованием, характерно изменение размеров, возникающее после снятия нагрузки в результате упругого отклика составляющих их компонентов: воздуха, содержащегося в порах, и полимерных модельных материалов. В качестве полимерного компонента в работе использовали парафин марки Т1. Выдержкой прессовки под нагрузкой достигается устранение негативного воздействия расширяющегося воздуха в результате его выхода через зазоры пресс-формы. В ходе эксперимента получена зависимость плотности прессовки от давления при одноосном вертикальном нагружении в жесткой цилиндрической матрице. Для изучаемого материала установлены величины теоретической (максимально достижимой) плотности и критического давления, при котором достигается теоретическая плотность. Экспериментально определены плотность и пористость в «литом» состоянии. Получена кривая аппроксимации, построенная по результатам эксперимента уплотнения материала полимерного компонента. Найдено логарифмическое уравнение аппроксимации необратимого уплотнения при прессовании. Таким образом, получен интервал значений давления, при котором плотность полимерного материала в прессовке будет технологически приемлемой.

Ключевые слова: закон уплотнения, давление, упругий отклик, прессование полимеров, парафин, выплавляемые модели, нагрузка, размерная точность, пресс-форма, отливка.

S.G. Zhilin, O.N. Komarov, D.A. Potianikhin, A.A. Sosnin

Institute of Machinery and Metallurgy, Far-Eastern Branch of Russian Academy
of Sciences, Komsomolsk-na-Amure, Russian Federation

DETERMINATION OF LOGARITHMIC COMPACTION EQUATION PARAMETERS FOR THE DESCRIPTION OF A PROCESS OF UNIAXIAL COMPACTION OF POWDER BODY MADE OF POLYMERIC MATERIAL

Investment patterns are extensively used in special types of casting. It is customary to produce them by pouring of liquid pattern material or pressing of paste-like one into a press die. It has been found experimentally that their manufacturing with the use of polymeric material pressing improves dimensional and geometrical accuracy of foundry goods. Technologically appropriate density of such compacts accounts for 88-92% of polymeric material density at molded state. In a number of circumstances the compacts produced by pressing are characterized by change in dimensions, which appears after unloading as a result of elastic aftereffect of their ingredients such as air contained in pores, and polymeric lost wax materials. In the present study T1 grade paraffin was used as polymeric compound. Elimination of negative impact of air is achieved by standing of compact under load. In this case the air leaves through the clearances of press die. During the experiments it was obtained the dependence of compact density on pressure under uniaxial loading in rigid cylindrical die. For the material under investigation the values of theoretical (i.e. maximum available) density and critical pressure, which leads to theoretical density attainment, were determined. Material density and porosity at molded state were found experimentally. It was obtained the approximation curve resulting from the experiment on polymeric material compacting. Logarithmic approximation of irreversible compaction equation under pressing was formulated. In this way it has been obtained the interval of pressure values, which provide technologically appropriate density of polymer material in the compact.

Keywords: law of rolling, pressure, elastic response, pressing the polymeric material, hard wax, consumable pattern, load, accuracy to size, press mold, cast.

Литьем по выплавляемым моделям получают отливки различной конфигурации, в том числе с поверхностями, не требующими механической обработки [1, 2]. Технологическая последовательность получения литых заготовок включает несколько этапов: формирование выплавляемых моделей отливок запрессовкой модельной массы в жидком или пастообразном состоянии в пресс-форму; сборка извлеченных после застывания моделей на модельном блоке; последовательное нанесение на модельный блок огнеупорных слоев и их сушка; выплавление модельной массы из оболочковой формы в горячем теплоносителе; помещение форм в опорный наполнитель, их прокалка и заливка расплавом металла. Возникающий на этапе изготовления выплавляемой модели брак, связанный с появлением усадочных дефектов и неровностей поверхности, оказывает негативное влияние на качество литых

изделий. Формирование пористых выплавляемых моделей «холодным» прессованием дисперсного модельного материала решает проблему усадки материала, а размерные параметры такой выплавляемой модели регламентированы пресс-формой¹ [3]. Пористые выплавляемые модели обладают достаточными прочностными характеристиками и не оказывают расширяющего воздействия на керамическую форму при выплавлении из нее модельной массы [4–6]. В качестве модельного материала используют, как правило, полимерные воскообразные композиции на основе парафина и стеарина [1].

Для таких выплавляемых моделей характерна рассредоточенная по всему объему пористость. Процесс порообразования в модели саморегулирующийся, поэтому плотность различных участков составляет 80–97 % от плотности составляющих ее полимерных компонентов в «литом» состоянии. Плотность прессовки зависит от прилагаемого давления. Пластические свойства порошков модельного материала [7] существенно влияют на их способность воспроизводить конфигурацию модели и на размерно-геометрические характеристики последней. При получении пористой модели сложной конфигурации прессованием возникает неравномерное распределение свойств в объеме прессовки, что делает прогноз плотности на различных участках модели затруднительным. Так, например, плотность массивных участков прессовок значительно ниже, чем тонких частей [8].

Важным при получении прессовки является отсутствие внешнего проявления размерно-геометрических дефектов, связанных с упругим последствием материала модели, возникающим вследствие его переуплотнения [9]. Для получения прессовок с сопоставимыми размерами сторон достаточно уплотнить модельный материал до плотности на 10–12 % меньшей, чем плотность этого материала в «литом» состоянии [10].

Экспериментально установлено, что при формировании прессовки из дисперсного полимерного материала наибольшая плотность достигается в зонах, расположенных непосредственно под пресс-пуансоном, согласно схеме на рис. 1. Получение прессовки с прогнозируемым

¹ Пат. РФ № 2188735. Способ изготовления выплавляемых моделей / Сапченко И.Г., Жилин С.Г., Костина Т.В., Некрасов С.А. Оpubл. 10.09.2002. Бюл. № 25; Пат. РФ № 2227769. Способ изготовления удаляемых моделей / Сапченко И.Г., Жилин С.Г. Оpubл. 27.04.2004. Бюл. № 12.

распределением плотности и напряжений в ее объеме позволило бы повысить точность определения величины упругого отклика на каждом участке прессовки [11].

Для прогнозирования механических свойств выплавляемых моделей сложной конфигурации в процессе их прессования необходимо выбрать математическую модель уплотнения порошкового материала, которая бы описывала зависимость уплотнения от приложенного давления [12, 13]. В качестве такого закона было использовано безразмерное логарифмическое уравнение, содержащее две константы материала, одна из которых тождественно равна единице.

Целью работы является определение параметров логарифмического уравнения прессования для описания процесса одноосного уплотнения порошкового тела из полимерного материала.

В рамках поставленной цели решались следующие задачи:

- определение максимально достижимой плотности материала прессовки в условиях одноосного вертикального нагружения в жесткой матрице;
- определение константы выбранного уравнения прессования порошкового полимерного материала;
- получение кривой аппроксимации, построенной по результатам эксперимента.

В качестве полимерного компонента модельной массы в работе использовали парафин марки Т1 [12]. Плотность очищенного парафина при 15 °С варьируется в пределах 0,881–0,905 г/см³ [14]. С целью определения его плотности в «литом» состоянии свободной заливкой расплава парафина при температуре выше 60 °С в цилиндрическую емкость диаметром 72,6 мм и высотой 270 мм получили цилиндр с усадочной раковинкой. После отсечения части цилиндра с усадкой получили конечную высоту образца – 170 мм. «Литая» плотность используемого парафина составила 0,860 г/см³.

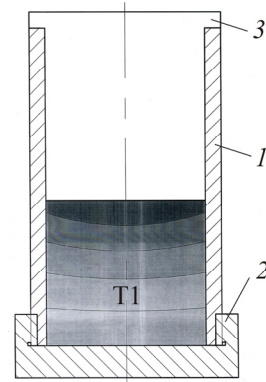


Рис. 1. Схема одноосного прессования с распределением плотности материала в прессовке после уплотнения: 1 – жесткая пресс-матрица; 2 – нижняя крышка; 3 – пресс-пуансон

Экспериментальное исследование поведения модельного материала при прессовании выполнялось в жесткой цилиндрической пресс-матрице, выполненной из стали Ст45 (см. рис. 1). Ее внутренний диаметр составляет 50,15 мм, толщина стенки 4 мм. Нагрузка прикладывалась при помощи универсальной испытательной машины Shimadzu AG-Xplus. Температура воздуха в помещении составляла 21 °С.

С целью визуализации распределения полимерного материала в ходе прессования его слои последовательно засыпались в пресс-форму, разделяемые слоями графитового порошка, размер фракции которого составлял 10 % от фракции полимерного материала. На рис. 2 представлены сечения прессовок в диаметральной плоскости, полученные при одноосном уплотнении порошкового тела со скоростью 1 мм/с (рис. 2, а) и при квазистатическом уплотнении (рис. 2, б).

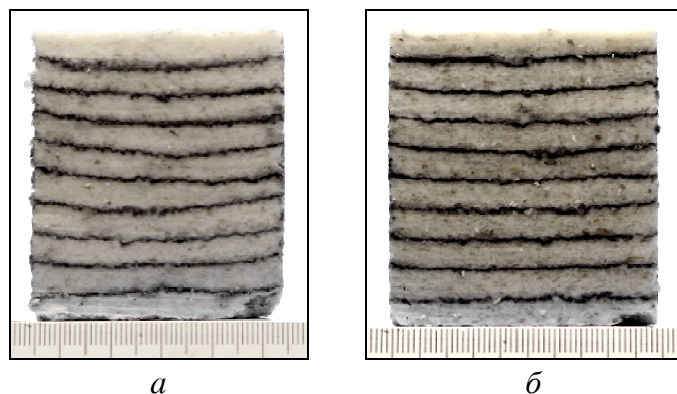


Рис. 2. Сечения прессовок в диаметральной плоскости, полученные при одноосном прессовании порошкового тела при скорости прессования 1 мм/с (а) и в квазистатическом режиме (б)

Видно, что при квазистатическом режиме уплотнения достигается более равномерное уплотнение слоев материала. Дальнейшие эксперименты проводились в квазистатическом режиме. Прессовка из однородного полимерного материала выдерживалась при заданном давлении в течение нескольких часов, до полного перераспределения напряжений внутри пористого тела и прекращения движения пресспуансона. Затем прессовка вынималась из пресс-формы и измерялась ее плотность.

Для описания процесса уплотнения полимерной композиции будем использовать безразмерное двухпараметрическое уравнение прес-

сования [15]. Уравнение зависимости относительной плотности прессовки от давления прессования имеет вид

$$\rho = b \cdot \ln P + a. \quad (1)$$

где ρ – текущая плотность прессовки, отнесенная к теоретической (максимально достижимой) плотности материала, т.е. плотность в долях единицы, $\rho = \rho_{cur} / \rho_{theor}$; P – относительное (безразмерное) давление прессования, $P = P_{cur} / P_{crit}$; P_{cur} – текущее размерное значение давления; P_{crit} – критическое давление прессования, при котором достигается теоретическая плотность. Константа a равна относительной плотности прессовки при $P = 1$, следовательно, $a = 1$. Константа b характеризует способность пористого материала уплотняться под действием приложенного давления прессования. Для изучаемой полимерной композиции она определялась в результате серии экспериментов.

В ходе экспериментальных исследований установлено, что теоретическая плотность парафина марки Т1 составляет $0,912 \text{ г/см}^3$, соответствующее критическое давление 5 МПа. При значениях давления прессования больших, чем 5 МПа, плотность более не увеличивалась, деформирование происходило в упругой стадии. Логарифмическое уравнение аппроксимации строилось таким образом, чтобы получить меньшую погрешность в диапазоне технологически обоснованных давлений прессования, которые обеспечивают плотность прессовки, близкую к плотности в «литом» состоянии. Она составляет $0,860 \text{ г/см}^3$, или 0,943 в относительных величинах (т.е. пористость в «литом» состоянии составляет 5,7 %). Для этого давление прессования варьировалось в диапазоне от 0,1 до 0,6 МПа. В результате указанных нагрузок относительная плотность изменялась от 0,70 до 0,98 соответственно, или 74,2 и 104 % от «литой» плотности.

Константа b безразмерного логарифмического уравнения оказалась равной 0,0218. Тогда уравнение прессования исследуемого материала принимает вид

$$\rho = 0,0218 \cdot \ln P + 1. \quad (2)$$

На рис. 3 показана кривая аппроксимации (2). Для достижения технологически приемлемой плотности прессовки, состоящей из однородного полимерного материала, достаточным является относительное давление 0,01–0,04.

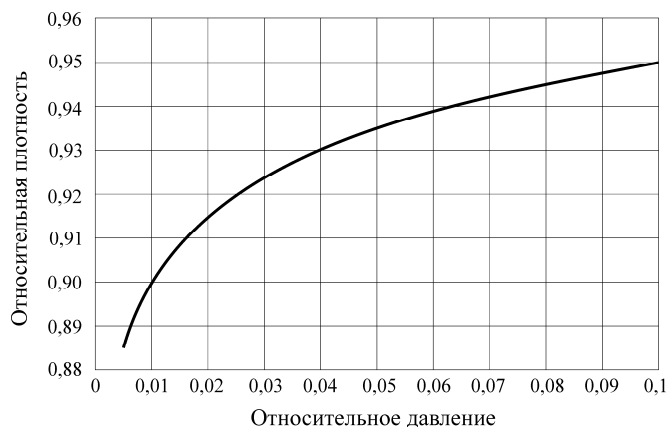


Рис. 3. Аппроксимация кривой уплотнения полимерной композиции

С целью предсказания механических свойств выплавляемых моделей, получаемых прессованием дисперсного полимерного материала, выведено логарифмическое уравнение уплотнения. Для определения коэффициентов уравнения проводились экспериментальные исследования по одноосному вертикальному уплотнению парафина марки Т1 в жесткой цилиндрической пресс-форме. Определены плотность и пористость исследуемого модельного материала в «литом» состоянии. Экспериментально установлены значения теоретической (максимально достижимой) плотности и критического давления, при котором она достигается. Анализ проведенных экспериментов и полученной аппроксимации кривой уплотнения позволяет определить диапазон давлений прессования, которые обеспечивают технологически приемлемую пористость получаемой прессовки.

Полученные параметры уравнения прессования дают возможность определить коэффициент бокового давления, коэффициент пристенного трения, коэффициент межчастичного трения, модуль упругости и коэффициент Пуассона. Указанные коэффициенты, в свою очередь, позволят получить точное прогнозное значение упругого отклика материала прессовки как вдоль оси прессования, так и в поперечном направлении. Последнее решит ряд проблем, связанных с проектированием пресс-форм, применяемых для изготовления выплавляемых моделей прессованием.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта ДВО РАН (проект 15-1-4-018) «Расчетное и опытное совершенствование процессов профилирования и высокоточного литья на основе новых модельных представлений и специальной серии вычислительных экспериментов (Раздел 4)».

Список литературы

1. Озеров В.А. Литье по выплавляемым моделям. – М.: Машиностроение, 1994. – 448 с.
2. Сапченко И.Г., Жилин С.Г. Влияние пористости моделей на их свойства, качество оболочковых форм и отливок // Литейное производство. – 2003. – № 4. – С. 12–15.
3. Сапченко И.Г., Жилин С.Г., Комаров О.Н. Управление структурой и свойствами пористых комбинированных удаляемых моделей. – Владивосток: Дальнаука, 2007. – 138 с.
4. Сапченко И.Г., Жилин С.Г., Евстигнеев А.И. Исследование процесса удаления пористых моделей из оболочковых форм // Литейное производство. – 2002. – № 7. – С. 21–22.
5. Сапченко И.Г., Жилин С.Г., Комаров О.Н. Технологии использования порошковых материалов в литье по выплавляемым моделям // Литье и металлургия. – 2003. – № 3. – С. 38–39.
6. Сапченко И.Г., Жилин С.Г., Евстигнеев А.И. Об особенностях проектирования и использования оснастки при изготовлении пористых выплавляемых моделей // Литейное производство. – 2010. – № 2. – С. 26–31.
7. Медведев Я.И., Валисовский И.В. Технологические испытания формовочных материалов. – М.: Машиностроение, 1973. – 312 с.
8. Сапченко И.Г., Жилин С.Г., Комаров О.Н. Повышение точности пористых моделей в литье по выплавляемым моделям // Литье и металлургия. – 2005. – № 1. – С. 100–102.
9. Жилин С.Г., Сапченко И.Г., Комаров О.Н. Упругий отклик прессовок при деформировании гетерогенных порошковых материалов // Вестник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева. Сер.: Механика предельного состояния. – 2015. – № 4. – С. 163–168.
10. Жилин С.Г., Сапченко И.Г., Комаров О.Н. Формирование прессовок из порошков полимерных изотропных материалов // Вест-

ник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева. Сер.: Механика предельного состояния. – 2016. – № 2(28). – С. 3–14.

11. Сапченко И.Г., Жилин С.Г., Штерн М.В. Точность удаляемых моделей и качество оболочковых форм в литье по выплавляемым моделям // Литейное производство. – 2005. – № 2. – С. 20–22.

12. Математическое моделирование процессов получения полимерных моделей / И.Г. Сапченко, С.Г. Жилин, О.Н. Комаров, М.В. Штерн // Литейное производство. – 2006. – № 1. – С. 31–32.

13. Сапченко И.Г., Жилин С.Г., Комаров О.Н. Влияние пластичности полимерного порошкового материала при прессовании удаляемых моделей на формирование их напряженно-деформированного состояния // Ученые записки КнАГТУ. – 2013. – № 2. – С. 83–89.

14. Кнунянц И.Л. Химическая энциклопедия. – М.: Сов. энцикл., 1992. – Т. 3. – 639 с.

15. Ультразвуковая технология изготовления конструкционной и функциональной нанокерамики / О.Л. Хасанов, В.М. Соколов, Э.С. Двилис, Ю.П. Похолков // Перспективные материалы. – 2002. – № 1. – С. 76–83.

References

1. Ozerov V.A. Lit'e po vyplavliaemym modeliam [Investment casting]. Moscow: Mashinostroenie, 1994. 448 p.

2. Sapchenko I.G., Zhilin S.G. Vliianie poristosti modelei na ikh svoistva, kachestvo obolochkovykh form i otlivok [Influence of porosity of models on their properties, quality of shell forms and castings]. *Liteinoe proizvodstvo*, 2003, no. 4, pp. 12-15.

3. Sapchenko I.G., Zhilin S.G., Komarov O.N. Upravlenie strukturoi i svoistvami poristykh kombinirovannykh udaliaemykh modelei [Management of structure and properties of the porous combined deleted models]. Vladivostok: Dal'nauka, 2007. 138 p.

4. Sapchenko I.G., Zhilin S.G., Evstigneev A.I. Issledovanie protsessa udaleniia poristykh modelei iz obolochkovykh form [Research of process of removal of porous models of shell forms]. *Liteinoe proizvodstvo*, 2002, no. 7, pp. 21-22.

5. Sapchenko I.G., Zhilin S.G., Komarov O.N. Tekhnologii ispol'zovaniia poroshkovykh materialov v lit'e po vyplavliaemym modeliam

[Technologies of use of powder materials in casting on the melted models]. *Lit'e i metallurgii*, 2003, no. 3, pp. 38-39.

6. Sapchenko I.G., Zhilin S.G., Evstigneev A.I. Ob osobennostiakh proektirovaniia i ispol'zovaniia osnastki pri izgotovlenii poristykh vyplavl'aemykh modelei [About features of design and use of the equipment at production of the porous melted models]. *Liteinoe proizvodstvo*, 2010, no. 2, pp. 26-31.

7. Medvedev Ia.I., Valisovskii I.V. Tekhnologicheskie ispytaniia formovochnykh materialov [Technological tests of forming materials]. Moscow: Mashinostroenie, 1973. 312 p.

8. Sapchenko I.G., Zhilin S.G., Komarov O.N. Povyslenie tochnosti poristykh modelei v lit'e po vyplavl'aemym modeliam [Increase in accuracy of porous models in casting on the melted models]. *Lit'e i metallurgii*, 2005, no. 1, pp. 100-102.

9. Zhilin S.G., Sapchenko I.G., Komarov O.N. Uprugii otklik pressovok pri deformirovanii geterogennykh poroshkovykh materialov [Elastic response of pressings at deformation of heterogeneous powder materials]. *Vestnik Chuvashskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta imeni I.Ia. Iakovleva. Mekhanika predel'nogo sostoianiia*, 2015, no. 4, pp. 163-168.

10. Zhilin S.G., Sapchenko I.G., Komarov O.N. Formirovanie pressovok iz poroshkov polimernykh izotropnykh materialov [Formation of pressings from powders of polymeric isotropic materials]. *Vestnik Chuvashskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta imeni I.Ia. Iakovleva. Mekhanika predel'nogo sostoianiia*, 2016, no. 2(28), pp. 3-14.

11. Sapchenko I.G., Zhilin S.G., Shtern M.V. Tochnost' udaliaemykh modelei i kachestvo obolochkovykh form v lit'e po vyplavl'aemym modeliam [Accuracy of the deleted models and quality of shell forms in casting on the melted models]. *Liteinoe proizvodstvo*, 2005, no. 2, pp. 20-22.

12. Sapchenko I.G., Zhilin S.G., Komarov O.N., Shtern M.V. Matematicheskoe modelirovanie protsessov polucheniia polimernykh modelei [Mathematical modeling of processes of receiving polymeric models]. *Liteinoe proizvodstvo*, 2006, no. 1, pp. 31-32.

13. Sapchenko I.G., Zhilin S.G., Komarov O.N. Vliianie plastichnosti polimernogo poroshkovogo materiala pri pressovanii udaliaemykh modelei na formirovanie ikh napriazhenno-deformirovannogo sostoianiia [Influence of plasticity of polymeric powder material when pressing of the deleted

models on formation of their intense deformed state]. *Uchenye zapiski Kom-somol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, no. 2, pp. 83-89.

14. Knunians I.L. *Khimicheskaiia entsiklopediia* [Chemical encyclopedia]. Moscow: Sovetskaia entsiklopediia, 1992. Vol. 3. 639 p.

15. Khasanov O.L., Sokolov V.M., Dvilis E.S., Pokholkov Iu.P. Ul'trazvukovaia tekhnologiia izgotovleniia konstruktsionnoi i funktsional'noi nanokeramiki [Ultrasonic manufacturing techniques of constructional and functional nanoceramics]. *Perspektivnye materialy*, 2002, no. 1, pp. 76-83.

Получено 10.08.2016

Об авторах

Жилин Сергей Геннадьевич (Комсомольск-на-Амуре, Россия) – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией химических и фазовых превращений в материалах Института машиноведения и металлургии ДВО РАН; e-mail: zhilin@imim.ru.

Комаров Олег Николаевич (Комсомольск-на-Амуре, Россия) – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории химических и фазовых превращений в материалах Института машиноведения и металлургии ДВО РАН; e-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru.

Потянихин Дмитрий Андреевич (Комсомольск-на-Амуре, Россия) – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории химических и фазовых превращений в материалах Института машиноведения и металлургии ДВО РАН; e-mail: potyanikhin@mail.ru.

Соснин Александр Александрович (Комсомольск-на-Амуре, Россия) – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории проблем металлотехнологий Института машиноведения и металлургии ДВО РАН; e-mail: sosnin@imim.ru.

About the authors

Sergey G. Zhilin (Komsomolsk-na-Amure, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Chief of Laboratory of Chemical and Phase Transformations in Materials, Institute of Machinery

and Metallurgy, Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences; e-mail: zhilin@imim.ru.

Oleg N. Komarov (Komsomolsk-na-Amure, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher, Laboratory of Chemical and Phase Transformations in Materials, Institute of Machinery and Metallurgy, Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences; e-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru.

Dmitriy A. Potianikhin (Komsomolsk-na-Amure, Russian Federation) – Ph. D. in Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Chemical and Phase Transformations in Materials, Institute of Machinery and Metallurgy, Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences; e-mail: potyanikhin@mail.ru.

Aleksandr A. Sosnin (Komsomolsk-na-Amure, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Researcher, Laboratory of Problem of Technology of Metals, Institute of Machinery and Metallurgy, Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences; e-mail: sosnin@imim.ru.