

Жилин С.Г., Комаров О.Н., Соснин А.А., Богданова Н.А. Влияние упругого отклика на размерно-геометрические характеристики протяженной прессовки, полученной из воскообразного материала мундштучным выдавливанием // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2018. – Т. 20, № 2. – С. 27–34. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.2.04.

Zhilin S.G., Komarov O.N., Sosnin A.A., Bogdanova N.A. How elastic response affects dimensional geometric characteristics of an extended compact that is been obtained from a waxy material by mouthpiece extrusion. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2018, vol. 20, no. 2, pp. 27–34. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.2.04.

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 20, № 2, 2018
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2018.2.04
УДК 621.74.045:53.09

С.Г. Жилин, О.Н. Комаров, А.А. Соснин, Н.А. Богданова

Институт машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения
Российской академии наук, Комсомольск-на-Амуре, Россия

**ВЛИЯНИЕ УПРУГОГО ОТКЛИКА НА РАЗМЕРНО-ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ПРОТЯЖЕННОЙ ПРЕССОВКИ, ПОЛУЧЕННОЙ ИЗ ВОСКООБРАЗНОГО МАТЕРИАЛА
МУНДШТУЧНЫМ ВЫДАВЛИВАНИЕМ**

Одной из приоритетных производственных задач является получение литых заготовок высокой точности, поверхность которых не нуждается в дополнительной механической обработке. Методом, направленным на решение этой проблемы, является литье по выплавляемым моделям. При получении выплавляемых моделей холодным прессованием порошков воскообразных композиций достигаются высокие размерно-геометрические параметры формованных изделий, отличающиеся отсутствием усадочных дефектов. Однако недостатком такого способа формирования протяженных участков выплавляемых моделей является упругий отклик уплотненного материала, что в ряде случаев приводит к увеличению размеров прессовки в продольном направлении на 0,7–1,2 %, а в поперечном на 0,4–0,5 %. Сложность прогноза этого эффекта заключается в неравномерном распределении плотности в объеме получаемых прессовок. Управление размерами протяженных прессовок, в том числе с переменным сечением и сложной конфигурацией, представляется актуальной задачей для проектирования оснастки. Целью эксперимента стало определение возможности управления величиной упругого отклика протяженного участка выплавляемой модели, полученной выдавливанием порошка воскообразного материала через мундштук без его предварительного нагрева.

Представлены результаты серии экспериментов по регулированию величины упругого отклика материала в ходе моделирования процесса получения протяженных прессовок, получаемых выдавливанием через мундштук. Изменяемым параметром в эксперименте была скорость выдавливания. Регистрируемыми параметрами были следующие: нагрузка, создаваемая в цилиндрическом поршне, заполненном фракцией воскообразного материала; температура выдавливаемого материала, плотность и величина его упругого отклика по длине получаемой прессовки. Изменением скорости формирования прессовок снижается неравномерность распределения свойств, что позволяет прогнозировать конечные размеры формовки, учет которых важен при проектировании пресс-оснастки.

Ключевые слова: напряжение, деформация, пористость, воскообразные материалы, размерно-геометрическая точность, упругий отклик, выдавливание, плотность, фракция, выплавляемая модель.

S.G. Zhilin, O.N. Komarov, A.A. Sosnin, N.A. Bogdanova

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

**HOW ELASTIC RESPONSE AFFECTS DIMENSIONAL GEOMETRIC CHARACTERISTICS
OF AN EXTENDED COMPACT THAT IS BEEN OBTAINED FROM A WAXY MATERIAL
BY MOUTHPIECE EXTRUSION**

The production of cast billets of high accuracy, the surface of which does not require additional machining, is one of the priority production tasks. Investment casting is a method that solve this problem. In the production of melted models by cold pressing of powders of waxy compositions, high dimensional geometric parameters of molded articles are achieved, characterized by the absence of shrinkage defects. However, the elastic response of the compacted material is a disadvantage of this method of forming extended sections of the melted models. This, in some cases, leads to an increase in the dimensions of the compact in the longitudinal pressing direction by 0.7-1.2 %, and in the transverse direction by 0.4-0.5 %. This effect is difficult to predict due to the uneven distribution of density in the volume of the resulting compacts. To design a tools, we need to manage the dimensions of extended compacts, including those with a variable cross-section and complex configuration. The purpose of our experiment is that we want to establish the possibility of controlling the magnitude of the elastic response of an extended section of a melted model obtained by extruding a waxy powder powder through the mouthpiece without preheating it. In this paper we present the results of a series of experiments on the regulation of the magnitude of the elastic response of a material during the simulation of the process of obtaining extended compacts obtained by extrusion through a mouthpiece. The extrusion velocity was a variable parameter in the experiment. The parameters recorded are: the load created in a cylindrical piston filled with a waxy material fraction, the temperature of the extruded material, the density and the

magnitude of its elastic response along the length of the resulting compact. The unevenness of the distribution of properties is reduced due to a change in the rate of formation of compacts, this allowed us to predict the final dimensions of the molding, which are important for the design of press tools.

Keywords: tension, deformation, porosity, waxy materials, dimensional-geometric accuracy, elastic response, extrusion, density, fraction, smelting model.

Для получения литых заготовок сложной пространственной конфигурации с минимальными припусками на механическую обработку (а в ряде случаев их отсутствием) наиболее предпочтительным представляется метод литья по выплавляемым моделям [1, 2]. Такой способ позволяет объединять отдельные детали в цельнолитые узлы, уменьшая массу и габаритные размеры литых заготовок с толщиной стенки до 1 мм, шероховатостью поверхности Ra до 1,25 мкм. Такие отливки должны соответствовать 11–16 квалитетам при допусках на размеры рабочей полости пресс-формы, не превышающих 8–9 квалитетов (согласно ГОСТ 25347–82. Основные нормы взаимозаменяемости. Единая система допусков и посадок. Поля допусков и рекомендуемые посадки). В ряде случаев механическая обработка таких отливок не требуется [3].

Наряду с очевидными преимуществами такой процесс получения литых заготовок требует более значительных энергозатрат относительно других методов, длителен, включает большое количество операций и широкую номенклатуру используемых материалов. Последовательность технологических операций при осуществлении традиционного метода получения литья по выплавляемым моделям следующая: получение выплавляемых моделей (расплавление, запрессовка модельной массы в пресс-форму, охлаждение готовой модели и, если требуется, ее механическая доработка); получение модельного блока припаиванием выплавляемых моделей к элементам литниково-питающей системы. Затем изготавливают оболочковую форму последовательным нанесением и сушкой огнеупорных слоев на модельном блоке; выплавление моделей из оболочковой формы; помещение последней в опорный наполнитель, прокаливание и заливание формы расплавом.

В литье по выплавляемым моделям суммарный брак всех технологических операций достигает 30 % и обуславливается деформационными и усадочными процессами, а также свойствами применяемых материалов [4]. Так, расширение моделей при их выплавлении из оболочковой формы, термообработка последних приводят к возникновению сколов и трещин, образующихся в результате температурных деформаций, связанных с неравномерностью прогрева, а также закипания включений модельной массы, поступившей во внутренние слои оболочковой формы на стадии выплавления

из нее модельного блока [5]. При получении выплавляемой модели заливкой жидкого воскообразного материала в пресс-форму глубина усадочной раковины зависит от размеров теплового узла и в ряде случаев составляет 8–10 % от продольного размера изделия, выполненного из парафина, и 3–5 % для изделия из ПС 50/50.

Сокращение суммарного влияния температурных напряжений в материале выплавляемых моделей и связанных с этим деформаций оболочковых форм возможно благодаря применению пористых выплавляемых моделей, получаемых холодным прессованием порошков воскообразных композиций [4–7]. Такой подход в получении выплавляемой модели позволяет сформировать ее структуру без усадочных дефектов, прогнозировать распределение напряжений по объему прессовки и обеспечивает управляемую разность значений плотности ее участков [8, 9].

Предпочтительно использовать прессованные выплавляемые модели с пористостью, соответствующей величине коэффициента линейно-термического расширения материала. Это позволяет компенсировать напряжения, вызванные температурным расширением материала прессовки при нагреве модельной массы и ее выплавлении из оболочковой формы, и не приводит к разрушению последней. Прессованные модели обладают повышенной размерно-геометрической точностью (на 1–2 квалитета выше, чем у традиционных выплавляемых моделей), регламентируемой размерами и шероховатостью формообразующей полости пресс-формы.

На рис. 1 представлено сравнение поверхности традиционной (а) и прессованной пористой (б) выплавляемой модели. Видно, что выплавляемая модель, полученная заливкой жидкой воскообразной массы, имеет порок в виде тепловой усадки, которая отсутствует у пористой выплавляемой модели, полученной холодным прессованием модельного порошка.

Однако применение такого приема ограничивается реологическими характеристиками используемых материалов. При получении прессованной выплавляемой модели сложной конфигурации с переменной толщиной прогнозировать значения плотности различных ее участков в ряде случаев затруднительно. Сложность заключается в отсутствии данных о значении величины упругого от-

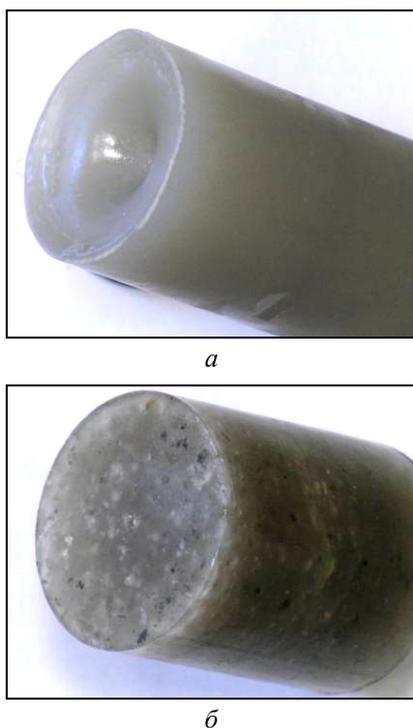


Рис. 1. Внешний вид выплавляемых моделей, изготовленных из парафина марки Т1

клика материала [10–12]. По завершении релаксации материала плотность может распределяться неравномерно и может отличаться от расчетных значений [13, 14]. Экспериментально определено, что суммарное влияние релаксации компонентов прессованной выплавляемой модели (воздуха и воскообразного модельного материала) приводит к увеличению ее размеров в продольном направлении на 0,7–1,2 %, а в поперечном на 0,4–0,5 % [15]. Величина упругого отклика материала в массивных узлах выплавляемой модели определяется временем выдержки прессовки под нагрузкой [16]. Устранение и прогнозирование величины упругого отклика протяженных тонкостенных участков прессованной модели затруднено и представляется малоизученным. Таким образом, несоответствие размеров формообразующей полости пресс-формы конечным размерам прессованной выплавляемой модели, проявляющееся в меньшей мере, чем при использовании традиционного процесса, все же остается проблемой. Решение этой проблемы определяет актуальность представленных в настоящей работе результатов исследований.

Таким образом, целью эксперимента является исследование возможности управления величиной упругого отклика протяженного участка выплавляемой модели, полученной холодным выдавливанием порошка воскообразного модельного материала через мундштук.

В рамках поставленной цели решались следующие задачи: определение нагрузки, необходимой для создания условий, при которых порошок модельной композиции поступает в пластифицированном состоянии через мундштук, имитируя процесс заполнения уплотняемым материалом поднутренной пресс-формы; определение температуры выдавливаемого материала в зоне его подачи в мундштук при изменении скорости перемещения пресс-пуансона; экспериментальное определение скорости выдавливания воскообразного материала через мундштук, при которой величина упругого отклика получаемой прессовки будет минимальной.

Распространенным материалом, применяемым для получения выплавляемых моделей является равнокомпонентный сплав парафина и стеарина ПС 50/50, относящийся к 1-й классификационной группе [1]. Для снижения погрешности эксперимента в качестве уплотняемого порошкового тела использовали материал на основе парафина марки Т1 (по ГОСТ 23683–89. Парафины нефтяные твердые. Технические условия). Т1 имеет плотность при свободной заливке 0,86 г/см³ с учетом распределенной пористости; температура плавления, регламентированная ГОСТ 23683–89, составляет 52–58 °С.

Реализация поставленных задач осуществлялась при помощи тестовой машины AG-X plus Shimadzu, на рабочий стол которой устанавливалась стальная пресс-форма с цилиндрической внутренней поверхностью и внутренним диаметром 45 мм. В донной части пресс-форма снабжена диффузором в виде крышки с мундштуком, внутренний диаметр которого составляет 9 мм, как показано на рис. 2. Таким образом, отношение значений площади сечений уплотняемого порошкового тела и пластифицированного составляет 25 к 1. К диффузору подведена термопара типа ТП.ХА(К).Н, подключенная к цифровому регистратору Ш9329/1 для фиксации изменения температуры выдавливаемого через мундштук воскообразного материала.

В пресс-форму засыпали Т1 в виде порошка фракции 0,63 мм и перемещали поршень до полного выдавливания Т1 из мундштука. Скорость перемещения поршня при холодном выдавливании порошка для каждой серии экспериментов изменялась от 0,5 до 3 мм/с с шагом 0,25 мм/с. Во время каждого эксперимента скорость перемещения поршня постоянная.

Пластифицированный материал на выходе из мундштука представляет собой длинномерную прессовку круглого сечения, диаметр которой измеряли по длине прессовки с шагом 50 мм электронным цифровым регистратором DIN 863 Vogel с точностью измерения 0,001 мм. По отклонению

полученных значений от внутреннего диаметра мундштука регистрировали упругий отклик или усадку материала. Величину упругого отклика определяли по формуле

$$O_{упр} = ((A_1 - A_0)/A_0) \cdot 100 \%,$$

где $O_{упр}$ – величина упругого отклика, %; A_1 и A_0 – соответственно контролируемые размеры внутреннего диаметра мундштука и внешнего диаметра длинномерной прессовки, мм.

Напряженно-деформированное состояние исследуемой системы принято графически отображать в координатах напряжение–деформация. Поскольку в условиях постоянной скорости и изменяющегося давления прессования порошковое тело, пластифицируясь, выдавливается через мундштук, в нашем случае в качестве параметра оси ординат корректнее использовать нагрузку, которая возникает на поршне.

Для эксперимента выбран такой тип конструкции крышки пресс-формы, при котором реализуются условия затрудненного выдавливания пластифицированного материала из мундштука [17]. Представленная на рис. 2 картина течения уплотняемого материала, на который заметное влияние оказывают силы трения, характеризуется наличием сдвиговых деформаций периферийных слоев по всей высоте материала, наличием «мертвой зоны» [18], неравномерности деформации в поперечном сечении выдавливаемого материала. Вертикальное сечение материала, представленное на рис. 2, характерно для начала его выдавливания из пресс-формы. Такой характер деформации материала, при котором пластическая зона охватывает всю полость пресс-формы, должен приводить к неравномерному распределению свойств получаемой длинномерной прессовки.

Достижение относительного равномерного распределения свойств в такой прессовке возможно благодаря выдавливанию материала через

мундштук. Учет характеристик прессовки позволяет прогнозировать распределение свойств в различных зонах прессованных моделей [19].

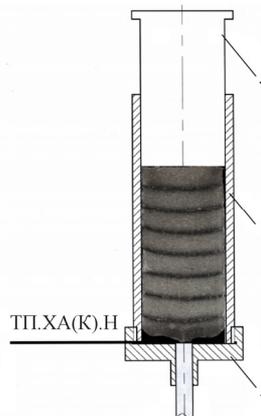


Рис. 2. Схема выдавливания модельного материала через мундштук: 1 – цилиндрическая пресс-форма; 2 – крышка с мундштуком; 3 – поршень

Скорость перемещения пресс-пуансона в значительной степени влияет на деформационную картину в целом и на свойства длинномерной прессовки [20]. На рис. 3 представлены зависимости нагрузки, создаваемой на поршне при холодном выдавливании помещенного в пресс-форму порошка фракции 0,63 мм через мундштук, от перемещения пресс-поршня при наиболее характерных скоростях процесса выдавливания. Видно, что пиковая нагрузка, определяющая начало процесса выдавливания материала из мундштука, при скорости перемещения поршня 0,5 мм/с составляет 25 кН, а при скорости 3 мм/с – 35 кН. На этой стадии выдавливания различие в нагрузках представленных режимов превышает 30 %. При выходе режима выдавливания на стационарный различие в нагрузках не превышает 10 %.

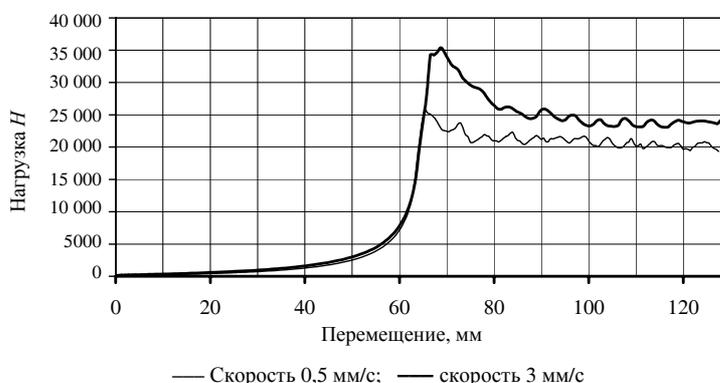


Рис. 3. Зависимость нагрузки (H), создаваемой на поршне для холодного выдавливания пластифицированного порошкового тела через мундштук, от перемещения (мм) поршня при различных скоростях процесса

В результате регистрации значений температуры материала в зоне его перехода из полости пресс-формы в мундштук также установлены существенные различия. В ходе эксперимента, проводившегося при температуре окружающей среды 19 °С, температура материала в момент пиковой нагрузки при скорости перемещения пресс-поршня 0,5 мм/с возросла на 38 %, а для скорости 3 мм/с ее рост составил 43 %. При выходе процесса на установившийся режим выдавливания, при котором нагрузка меняется незначительно, температура плавления материала не была достигнута благодаря высокой теплоемкости материала пресс-формы.

В ходе эксперимента установлено, что средняя плотность получаемых длинномерных прессовок не находится в прямой зависимости от скорости выдавливания в случаях, когда температура пластифицируемого материала при установившемся режиме выдавливания значительно ниже температуры его расплавления. Таким образом, средняя плотность длинномерных прессовок характерна для плотности материала Г1, получаемой при свободной заливке, и составляет 860 г/см³.

На поверхности длинномерной прессовки, полученной при скорости перемещения пресс-поршня 3 мм/с, визуально определимы усадочные дефекты, проявляющиеся в начале длинномерной прессовки. Отмеченное подтверждается данными, представленными на рис. 4, где приведено распределение величины упругого отклика материала по длине прессовок, полученных при различных скоростях выдавливания материала из мундштука. Видно, что упругий отклик длинномерной прес-

совки, полученной при скорости перемещения пресс-поршня 3 мм/с, в ряде случаев достигает 1 %, а при скорости поршня 0,5 мм/с не превышает 0,7 %. При этом к суммарному значению искажений размеров прессовки от диаметра профилирующего мундштука необходимо добавить глубину усадки материала, что в целом определяет недопустимость применения повышенной скорости выдавливания для получения длинномерной прессовки с минимальными искажениями размеров.

Таким образом, установлено, что теплофизические условия формирования длинномерной прессовки из порошкового тела холодным выдавливанием через мундштук определяются величиной нагрузки, создаваемой при передаче давления прессования порошковому телу. Экспериментально установлено, что с увеличением скорости перемещения пресс-пуансона от 0,5 до 3 мм/с напряжение возрастает на 30 %. Наименьший упругий отклик выдавливаемой длинномерной прессовки достигается в интервале значений скорости перемещения пресс-поршня 0,5–1,5 мм/с. С увеличением скорости уплотнения в прессовке после снятия нагрузки появляются отрицательные значения упругого отклика, характеризующие появление усадочных дефектов, связанных с локальным перегревом материала. Эти данные позволяют управлять величиной упругого отклика материала уплотняемого порошкового тела путем регулирования нагрузки при выдавливании.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 007-00285-18-00.

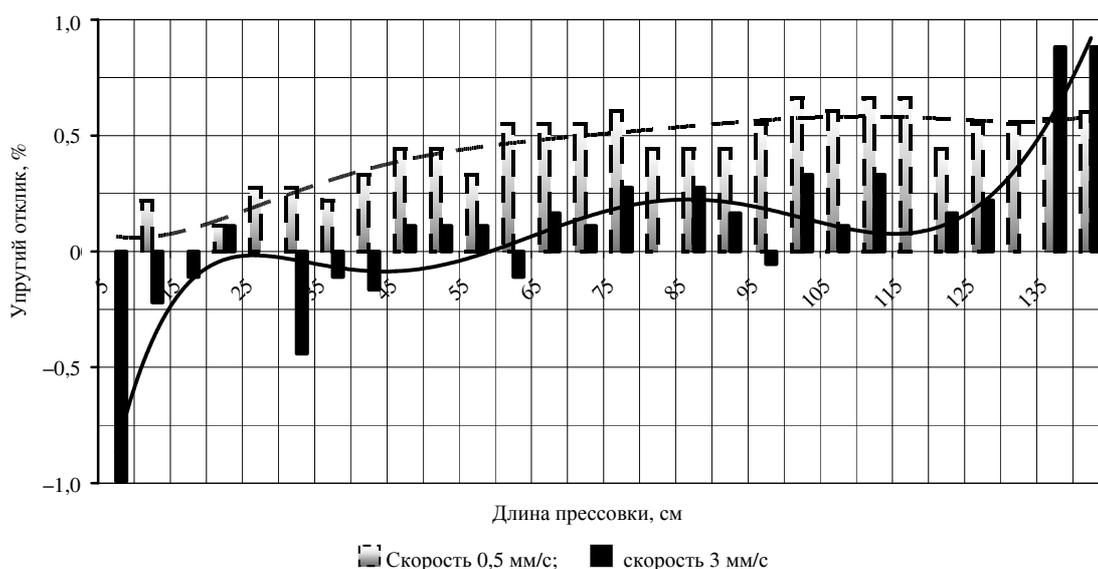


Рис. 4. Распределение величины упругого отклика материала по длине прессовок, полученных при различных скоростях выдавливания материала из мундштука

Список литературы

1. Литье по выплавляемым моделям / В.Н. Иванов, С.А. Казеннов, Б.С. Курчман [и др.]; под общ. ред. Я.И. Шкленника, В.А. Озерова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1984. – 408 с.

2. Специальные способы литья: справ. / В.А. Ефимов, Г.А. Анисович, В.Н. Бабич [и др.]; под общ. ред. В.А. Ефимова. – М.: Машиностроение, 1991. – 436 с.

3. Иванов В.Н. Брак и дефекты в литье по выплавляемым моделям. – М.: Машгиз, 1959. – 72 с.

4. Жилин С.Г. Управление структурой и свойствами пористых комбинированных удаляемых моделей: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.04. – Комсомольск-на-Амуре, 2002. – 218 с.

5. Sapchenko I.G., Potianikhin D.A., Komarov O.N. Mesomechanics of technological properties of powdered polymer compacts in lost wax casting // AIP Conference Proceedings. – 2014. – Vol. 1623. – P. 543–546.

6. 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 Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2013. – Т. 1, № 2(14). – С. 83–89.

7. Жилин С.Г., Комаров О.Н., Соснин А.А. Моделирование процессов обработки материалов давлением на основе оценки напряженно-деформированного состояния прессовок из полимерных модельных композиций с использованием метода конечных элементов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2017. – Т. 19, № 2. – С. 48–66.

8. Жилин С.Г., Сапченко И.Г., Комаров О.Н. Упругий отклик прессовок при деформировании гетерогенных порошковых материалов // Вестник Чувашского государственного педагогического университета имени И.Я. Яковлева. Механика предельного состояния. – 2015. – № 4(26). – С. 163–168.

9. Жилин С.Г., Сапченко И.Г., Комаров О.Н. Формирование прессовок из порошков полимерных изотропных материалов // Вестник Чувашского государственного педагогического университета имени И.Я. Яковлева. Механика предельного состояния. – 2016. – № 2(28). – С. 3–14.

10. Об учете упругих свойств вязкопластической смазки между соосными вращающимися цилиндрами / А.С. Бегун, А.А. Буренин, С.Г. Жилин, Л.В. Ковтанюк // Прикладная механика и техническая физика. – 2015. – Т. 56, № 3(331). – С. 213–223.

11. Бегун А.С., Буренин А.А., Ковтанюк Л.В. Большие необратимые деформации в условиях изменяющихся механизмов их производства и проблема задания пластических потенциалов // Доклады Академии наук. – 2016. – Т. 470, № 3. – С. 275–278.

12. Бегун А.С., Буренин А.А., Ковтанюк Л.В. Течение упруговязкопластического материала между вращающимися цилиндрическими поверхностями в условиях нежесткого сцепления // Прикладная механика и техническая физика. – 2015. – Т. 56, № 2(330). – С. 146–158.

13. Определение параметров логарифмического уравнения прессования для описания процесса одноосного уплотнения порошкового тела из полимерного материала / С.Г. Жилин, О.Н. Комаров, Д.А. Потянихин, А.А. Соснин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2016. – Т. 18, № 4. – С. 48–59.

14. Экспериментальное определение параметров регрессионной зависимости Кольрауша для пористых прессовок из воскообразных порошковых композиций / С.Г. Жилин, О.Н. Комаров, Д.А. Потянихин, А.А. Соснин // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2018. – № 2(74). – С. 9.

15. Особенности формирования пористой структуры прессовок из полимерного дисперсного материала / С.Г. Жилин, О.Н. Комаров, А.А. Соснин, Д.А. Потянихин // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2016. – Т. IV, № 28. – С. 26–33.

16. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1986. – 224 с.

17. Медведев Я.И., Валисовский И.В. Технологические испытания формовочных материалов. – М.: Машиностроение, 1973. – 312 с.

18. Грабарник Л.М., Нагайцев А.А. Прессование цветных металлов и сплавов: учеб. для ПТУ. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1991. – 342 с.

19. Орлов Г.М. Текучесть формовочных смесей // Теория формовки. – М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1961. – 211 с.

20. Жилин С.Г., Комаров О.Н., Соснин А.А. Регулирование упругого отклика материала протяженных прессовок, сформированных холодным выдавливанием через мундштук полимерной дисперсной композиции // Актуальные проблемы механики сплошной среды: материалы науч. тр. V Междунар. конф. – 2017. – С. 87–88.

References

1. Lit'e po vyplavljaemym modeliam [Investment casting] V.N. Ivanov, S.A. Kazennov, B.S. Kurchman. Ed. Ia.I. Shklennika, V.A. Ozerova. 3 ed. Moscow: Mashinostroenie, 1984, 408 p.

2. V.A. Efimov, G.A. Anisovich, V.N. Babich et al. Special'nye sposoby lit'ya [Special ways of casting] spravochnik. Ed. V.A. Efimova. Moscow: Mashinostroenie, 1991, 436 p.

3. Ivanov V.N. Brak i defekty v lit'e po vyplavlivaemym modeliam [Marriage and defects in casting on the melted models]. Moscow: Mashgiz, 1959, 72 p.

4. Zhilin S.G. Upravlenie strukturoi i svoystvami poristyx kombinirovannykh udaliaemykh modelei [Management of structure and properties of the porous combined deleted models]. Ph. D. thesis. Komsomol'sk-na-Amure, 2002, 218 p.

5. Sapchenko I.G., Potianikhin D.A., Komarov O.N. Mesomechanics of technological properties of powdered polymer compacts in lost wax casting. AIP Conference Proceedings, 2014, Vol. 1623, pp. 543–546.

6. Sapchenko I.G., Zhilin S.G., Komarov O.N. Vliianie plastichnosti polimernogo poroshkovogo materiala pri pressovanii udaliamykh 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 Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, vol. 1, no. 2(14), pp. 83–89.

7. Zhilin S.G., Komarov O.N., Sosnin A.A. Modelirovanie protsessov obrabotki materialov davleniem na osnove otsenki napriazhenno-deformirovannogo sostoianiia pressovok iz polimernykh model'nykh kompozitsii s ispol'zovaniem metoda konechnykh elementov [Modeling of processing of materials pressure on the basis of assessment of the intense deformed condition of pressings from polymeric model compositions with use of a finite element method]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2017, vol. 19, no. 2, pp. 48–66.

8. 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(26), pp. 163–168.

9. 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.

10. Begun A.S., Burenin A.A., Zhilin S.G., Kovtaniuk L.V. Ob uchete uprugikh svoystv viazkoplasticheskoi smazki mezhdou soosnymi vrashchaiushchimisia tsilindrami [About accounting of elastic properties of visco-plastic lubricant between the coaxial rotating cylinders]. *Prikladnaia mekhanika i tekhnicheskaiia fizika*, 2015, vol. 56, no. 3(331), pp. 213–223.

11. Begun A.S., Burenin A.A., Kovtanyuk L.V. Bol'shie neobratimye deformatsii v usloviiah izmeniaiushchihisia mekhanizmov ih proizvodstva i problema zadaniia plasticheskikh potencialov [Big irreversible deformations in the conditions of the changing mechanisms of their production and a problem of a task of plastic potentials]. *Doklady Akademii nauk*, 2016, vol. 470, no. 3, pp. 275–278.

12. Begun A.S., Burenin A.A., Kovtanyuk L.V. Tschenie uprugoviazkoplasticheskogo materiala mezhdou vrashchaiushchimisia cilindricheskimi poverhnostiami v usloviiah nezhestkogo sopleeniia [Current of uprugoviazkoplasticheskyy material between the rotating cylindrical surfaces in the conditions of nonrigid coupling]. *Prikladnaia mekhanika i tekhnicheskaiia fizika*, 2015, vol. 56, no. 2(330), pp. 146–158.

13. Zhilin S.G., Komarov O.N., Potianikhin D.A., Sosnin A.A. Opredelenie parametrov logarifmicheskogo uravneniia pressovaniia dlia opisaniia protsessa odnoosnogo uplotneniia poroshkovogo tela iz polimernogo materiala [Determination of parameters of the logarithmic equation of

pressing for the description of process of monoaxial consolidation of a powder body of polymeric material]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2016, vol. 18, no. 4, pp. 48–59.

14. Zhilin S.G., Komarov O.N., Potyanihin D.A., Sosnin A.A. Eksperimental'noe opredelenie parametrov regressiionnoi zavisimosti Kol'rausha dlia poristykh pressovok iz voskoobraznykh poroshkovykh kompozitsii [Experimental determination of parameters of regression dependence of Kol'raush for porous pressings from waxy powder compositions]. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii*, 2018, no. 2(74), pp. 9.

15. Zhilin S.G., Komarov O.N., Sosnin A.A., Potianikhin D.A. Osobennosti formirovaniia poristoi struktury pressovok iz polimernogo dispersnogo materiala [Features of formation of porous structure of pressings from polymeric disperse material]. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2016, vol. IV, no. 28, pp. 26–33.

16. Rybin V.V. Bol'shie plasticheskie deformatsii i razrushenie metallov [Big plastic deformations and destruction of metals]. Moscow: Metallurgiya, 1986, 224 p.

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

18. Grabarnik L.M., Nagaitsev A.A. Pressovanie tsvetnykh metallov i splavov [Pressing of non-ferrous metals and alloys]. 2 ed. Moscow: Metallurgiya, 1991, 342 p.

19. Orlov G.M. Tekuchest' formovochnykh smesei. Teoria formovki [Fluidity of forming mixes. Theory of molding]. Moscow: Izdatel'stvo Akademii nauk SSSR, 1961, 211 p.

20. Zhilin S.G., Komarov O.N., Sosnin A.A. Regulirovanie uprugogo otklika materiala protiazhionnykh pressovok, sformirovannykh holodnym vydavlivaniem cherez mundshuk polimernoi dispersnoi kompozitsii [Regulation of an elastic response of material of the extended pressings created by cold expression through a mouthpiece of polymeric disperse composition]. *Aktual'nye problemy mekhaniki sploshnoi sredy: materialy nauchnykh trudov V Mezhdunarodnoi konferentsii*, 2017, pp. 87–88.

Получено 05.03.2018

Об авторах

Жилин Сергей Геннадьевич (Комсомольск-на-Амуре, Россия) – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией химических и фазовых превращений в материалах Института машиностроения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук; 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 машиностроения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук; e-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru.

Соснин Александр Александрович (Комсомольск-на-Амуре, Россия) – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории химических и фазовых превращений в материалах Института машиностроения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук; e-mail: sosnin@imim.ru.

Богданова Нина Анатольевна (Комсомольск-на-Амуре, Россия) – инженер лаборатории химических и фазовых превращений в материалах Института машиностроения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук; e-mail: joyful289@inbox.ru.

About the authors

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

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

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

Aleksandr A. Sosnin (Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Researcher Scientist, Laboratory of Chemical and Phase Transformations in Materials, Institute of Machinery and Metallurgy of Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences; e-mail: sosnin@imim.ru.

Nina A. Bogdanova (Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation) – Engineer, Laboratory of Chemical and Phase Transformations in Materials, Institute of Machinery and Metallurgy of Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences; e-mail: joyful289@inbox.ru.