

**Оригинальная статья**

УДК 621.74.045:53.09

DOI 10.17073/0368-0797-2022-11-758-768

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2429>

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ОБЪЕМНЫХ ПРЕССОВОК ИЗ СФЕРИЧЕСКИХ ВОСКООБРАЗНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

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

**Институт машиноведения и металлургии Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения РАН (Россия, 681005, Хабаровский край, Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, 1)**

**Аннотация.** Рост металлоемкости промышленного производства и объемов потребления готовой металлопродукции определяет актуальность разработки и исследования энергоэффективных технологических процессов, направленных на сокращение издержек за счет снижения числа операций при сохранении эксплуатационных характеристик продукта. В машиностроении задачи получения заготовок повышенной размерно-геометрической точности и сложной конфигурации решаются при помощи распространенного метода литья по выплавляемым моделям. Увеличению применения такого технологического подхода к получению заготовок в машиностроении препятствует ряд физических явлений, связанных с термическим расширением модельных и керамических материалов, что приводит к росту конечной стоимости продукта. Устранение значительного числа дефектообразующих факторов возможно за счет применения инновационного решения, заключающегося в формировании пористых удаляемых моделей прессованием композиций на основе воскообразных материалов. Таким способом решается проблема усадки материала и повышается трещиностойкость керамических форм, что позволяет в значительной мере сократить долю механической обработки заготовок в общем объеме технологических операций. Технические испытания нового метода позволили установить причину, по которой в настоящее время не удается полностью избавиться от операций механической обработки литых заготовок. Проблема преимущественно состоит в упругом отклике уплотняемого материала модельной композиции, что в ряде случаев сказывается на увеличении размеров прессовок. В работе рассмотрено исследование влияния начальной упаковки элементов сферической формы, имитирующих одно- и двухкомпонентные модельные композиции, на напряженно-деформированное состояние порошкового тела, подвергающегося одностороннему уплотнению в жесткой цилиндрической матрице до технологически обоснованных значений плотности. Результаты эксперимента представлены в виде зависимостей напряжения от деформации. Рассмотрены предпочтительные условия формирования прессовок с минимальными значениями упругого отклика уплотненного материала.

**Ключевые слова:** металлоемкое производство, специальные методы литья, технологические процессы, экспериментальное моделирование, формирование прессовок, воскообразные материалы, напряженно-деформированное состояние

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках государственного задания Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения РАН.

**Для цитирования:** Жилин С.Г., Богданова Н.А., Комаров О.Н. Экспериментальное моделирование процессов формирования объемных прессовок из сферических воскообразных элементов // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 11. С. 758–768.  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-11-758-768>

Original article

## EXPERIMENTAL SIMULATION OF VOLUMETRIC COMPACTS FORMATION FROM SPHERICAL WAXY ELEMENTS

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

**Institute of Metallurgy and Mechanical Engineering of the Khabarovsk Federal Research Center, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (1 Metallurgov Str., Komsomolsk-on-Amur, Khabarovsk Territory 681005, Russian Federation)**

**Abstract.** The growth in metal intensity of industrial production and the volume of consumption of finished metal products determine the relevance of development and research of energy efficient technological processes aimed at reducing costs by reducing the number of operations while maintaining product performance. In mechanical engineering, the problem of obtaining blanks with increased dimensional and geometric accuracy and complex configuration is solved by using a common method of investment casting. Expansion of the use of such technological approach to produce blanks in mechanical engineering is hindered by a number of physical phenomena associated with the thermal expansion of investment and ceramic materials, which leads to an increase in the product final cost. A significant number of defect-forming factors can be eliminated by applying an innovative

solution consisting in the formation of porous removable models by compacting mixtures based on waxy materials. This solves the problem of material shrinkage and increases the crack resistance of ceramic molds, which significantly reduces the share of machining in the overall volume of technological operations. Technical tests of the new method have revealed the reason why the machining of castings cannot be completely eliminated at present. The problem mainly lies in elastic response of compacted material of the model mixture, which, in some cases, affects the increase in the compacts size. This paper considers the effect of initial packing of spherical-shaped elements simulating one- and two-component model mixtures on the stress-strain state of a powder body subjected to unilateral compaction in a rigid cylindrical matrix to technologically justified density values. The results of the experiment are presented in the form of stress-strain relations. Preferable conditions of compact formation with minimal values of elastic response of the compacted material are considered.

**Keywords:** metal-intensive production, special casting methods, technological processes, experimental modeling, molding, waxy materials, stress-strain state

**Funding:** The work was performed within the framework of the state task of Khabarovsk Federal Research Center, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.

**For citation:** Zhilin S.G., Bogdanova N.A., Komarov O.N. Experimental simulation of volumetric compacts formation from spherical waxy elements. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 11, pp. 758–768. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-11-758-768>

## ВВЕДЕНИЕ

Мировые тенденции роста объемов металлоемких производств, таких как авто-, авиа- и судостроение, определяют спрос на литейную заготовительную продукцию [1]. В современных условиях функционирования как российских, так и зарубежных предприятий машиностроительного комплекса определяющим фактором их устойчивого развития является разработка и применение энерго- и материалоемких технологий, обеспечивающих получение продукта с требуемым набором характеристик при низких уровнях затрат, связанных с внедрением таких технологий [2, 3]. Актуальность поиска вариантов решения этой проблемы представляется наиболее высокой для предприятий, реализующих многооперационный технологический цикл производства изделий, специализирующихся, например, на выпуске литой металлопродукции [4]. Высокий спрос на качественное литье подтверждается значительной долей его использования при получении сложных агрегатов и конструктивных узлов (более 70 % деталей современных двигателей внутреннего сгорания получены литьем). Задача сокращения числа операций при сохранении требуемых параметров качества изделий для предприятий, располагающих производством литых заготовок повышенной точности, в том числе со сложной конфигурацией, представляется наиболее острой [5]. Так, подразделения предприятий, специализирующихся на выпуске литья по выплавляемым моделям, помимо значительной номенклатуры используемых при получении отливок материалов неизбежно сталкиваются с проблемой значительного количества стадий технологического цикла. Несмотря на то, что технология литья по выплавляемым моделям (ЛВМ) ориентирована на получение литья, соответствующего 11–16 квалитетам при допусках на размеры рабочей полости пресс-формы не выше 8–9 квалитетов [6], каждый из этапов производства характеризуется определенными видами дефектов, которые в конце технологической цепи приводят к значительной

доле суммарного неисправимого брака и, как следствие, снижению конкурентоспособности продукции ввиду роста ее стоимости.

Традиционная последовательность операций получения отливок в литье по выплавляемым моделям состоит из следующих основных стадий [7]:

1 – формирование выплавляемых моделей заливкой (либо запрессовкой) жидкой (либо в виде пасты) воскообразной массы в пресс-форму, включающее исправление усадочных дефектов и сборку моделей на модельных блоках припаиванием;

2 – формирование на собранных модельных блоках керамической оболочки в ходе последовательного нанесения и сушки огнеупорных слоев (в среднем от трех до пяти) путем поочередного погружения модельного блока в суспензию и огнеупорную фракцию с сушкой каждого слоя;

3 – выплавление модельной массы из керамической оболочковой формы путем ее погружения в ванну с разогретым жидким теплоносителем (как правило, водой с температурой, превышающей температуру плавления модельного воскообразного состава);

4 – прокаливание керамических оболочковых форм при температуре около 900 °С для удаления из их структур остатков модельной массы и снижения температурного градиента при заливке расплавом;

5 – удаление керамики и элементов литниково-питающей системы с поверхности отливок, очистка и механическая обработка последних.

В результате анализа производственных данных и серии экспериментальных исследований установлено, что значительной проблемой большинства представленных операций являются теплофизические явления, связанные с получением и использованием выплавляемых воскообразных моделей (наиболее распространенных в практике применения данного способа) [8]. Так, на первом этапе усадочные процессы, сопровождающие остывание модельной массы в пресс-форме, приводят к уменьшению объемов изделия в среднем на 6–12 %, а в некоторых случаях и до 14 % и, как следствие, необходимости исправления данного вида

дефекта [9]. Кроме того, бездефектное формирование выплавляемой модели должно осуществляться в узком температурном интервале с целью исключения поверхностных пороков в виде складок и волнистости. Вторая стадия чревата нарушениями геометрии поверхности формирующегося внутреннего слоя керамики ввиду невысокой смачиваемости воскообразной модельной массы [10]. На третьем этапе, ввиду теплового расширения нагреваемой модельной массы, возможно нарушение целостности керамической формы и, как следствие, разрушение последней, либо присутствие в структуре конечного литья неметаллических включений [11]. Удаление заключенных в поры керамической формы остатков модельной массы также опасно ее термическим расширением и нарушением целостности керамики. В совокупности отмеченные недостатки приводят к необходимости применения припусков на механическую обработку существенно больших, чем это необходимо для получения требуемых размеров детали.

Современные технологические приемы снижения влияния представленных выше неблагоприятных факторов на конечные характеристики литья преимущественно сводятся к поиску вариантов оптимизации процессов, связанных с проектированием [12, 13], контролем [14] и некоторыми изменениями механических характеристик продуктов промежуточных стадий. Так, повышение точности выплавляемых моделей достигается в результате изменения составов модельных масс, что позволяет снизить коэффициент термического расширения [15]. Уменьшение величины усадки модели в ряде случаев достигается за счет снижения температуры запрессовки модельной массы. Трещиностойкость керамической оболочковой формы достигается, например, за счет армирования ее структуры различными материалами и вставками [16]. Отмеченные методы в совокупности положительно влияют на качественные характеристики литья, но проблема устранения большей части причин брака остается нерешенной, что определяет актуальность поиска комплексного варианта устранения дефектообразующих факторов.

В Хабаровском Федеральном исследовательском центре Дальневосточного отделения Российской академии наук с начала 2000-х годов осуществляется разработка технологических приемов и протекающих при этом физических процессов, позволяющих повысить размерную и геометрическую точность литых изделий [8]. В основе рассматриваемых в настоящей работе процессов положены принципы формирования выплавляемых моделей прессованием порошковых модельных композиций на воскообразной основе без внешних источников тепла. В процессе формирования прессовки за счет перемещения пресс-пуансона увеличивается нагрузка на порошковое тело, что приводит к механической диссипации, определяющей оплавление частиц порошка в зонах их контакта и появление жидкой фазы

воскообразного материала, обеспечивающей копирование формообразующей поверхности пресс-формы. Уплотнение порошкового тела происходит также в результате трения о стенки пресс-формы и деформации частиц. Реализация таких принципов формирования выплавляемых моделей с пористостью 6 – 12 % преследует ряд целей:

- отсутствие литейных дефектов (усадка, волнистость, нарушение геометрии взаимно-перпендикулярных поверхностей и т. д.);

- сокращение технологического цикла и снижение экологического производственного фактора за счет исключения операции расплавления модельной массы;

- обеспечение термостабильности прессовок благодаря равномерности распределения напряжений в их структуре за счет пористости;

- устранение дефектов керамических форм, связанных с тепловым расширением материала выплавляемых моделей как на стадии их выплавления, так и на стадии прокаливания керамики перед заливкой [8]. Пористость целесообразно считать по формуле

$$\Pi = \left( 1 - \frac{\rho_{\text{пор}}}{\rho_{\text{лит}}} \right) 100 \%,$$

где  $\rho_{\text{пор}}$  – плотность пористого прессованного материала, г/см<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{лит}}$  – плотность литого материала, г/см<sup>3</sup>.

Экспериментально установлено, что качество поверхности и геометрия таких прессовок соответствуют чистоте обработки пресс-формы, а точность прессовок на 1 – 2 квалитета выше, чем у выплавляемых моделей, полученных заливкой жидкого модельного материала в пресс-форму.

Несмотря на очевидные преимущества метода, его широкому распространению препятствует недостаточная изученность процесса упругой релаксации уплотненного воскообразного материала после снятия нагрузки при формировании прессовок сложной конфигурации. Так, экспериментально установлено, что величина упругого отклика цилиндрической прессовки (с отношением высоты к диаметру основания 1:1) из воскообразного материала на основе парафина в направлении, поперечном ходу прессования, достигает 0,4 – 0,6 % от размеров формообразующей полости пресс-формы, и 0,5 – 1,2 % в направлении оси прессования. Видно, что значения величины упругого отклика уплотненного модельного материала более, чем на порядок ниже значений усадки. Механическая прочность пористой структуры, полученной прессованием, несколько ниже, чем у традиционных выплавляемых моделей, но компенсируется более высокой теплоустойчивостью [8]. Повысить прочность и пористость прессовок, снизить величину упругого отклика уплотненного материала отчасти удастся включением в порошок модельного состава растворимых компонентов. Удаление таких комбинированных моделей из керами-

ческой оболочки выполняется в два этапа: помещение оболочки с модельным блоком в воду для удаления растворимых компонентов (и образованием изолированных пор в структуре модели) с последующим погружением в нагретый теплоноситель для выплавления остатков модельной воскообразной массы. Как правило, такие материалы в модельной композиции играют роль упругих элементов и не деформируются в ходе уплотнения порошкового тела [17].

Проблема прогноза значений упругой разгрузки материала при релаксации напряжений во многом определяется рядом факторов, среди которых, например, параметры уплотняемого порошкового материала (насыпная плотность, фракция и начальная упаковка), конфигурация прессовки и ее протяженность, наличие участков с существенными различиями площадей сечений, удаленность элемента прессовки от места поступления порошкового материала в пресс-форму и т. д. Предварительными экспериментами установлено, что при уплотнении равnofракционных компонентов увеличивается вероятность формирования прессовки с однородными характеристиками по ее высоте [10]. Отмеченные факторы в совокупности определяют картину напряженно-деформированного состояния прессовки и повышают вероятность неравномерного распределения плотности в объеме изделия и возможности некоторого изменения его геометрии после снятия нагрузки.

Прогнозирование конечных свойств прессовок сложной геометрии из порошковых материалов на воскообразной основе при помощи известных математических моделей и расчетных методов представляется затруднительным ввиду уникальности таких материалов. Поскольку, согласно результатам предварительных экспериментов [18], они характеризуются сочетанием значений модуля упругости Юнга  $E \sim 80$  МПа и коэффициента Пуассона  $\mu \sim 0,5$ , эти материалы не являются конструкционными, а их структура схожа со структурой ряда полимеров [19, 20]. Поэтому использование результатов известных расчетных методов [21 – 24] для целей описания напряженно-деформированного состояния прессовок и проектирования пресс-форм видится весьма сложным и определяет необходимость осуществления натурального эксперимента. В этой связи устранение упругого отклика уплотненного материала, равно как и разработка методов прогнозирования его величины в различных участках прессовок, определяет актуальность исследований, предпринимаемых в данном направлении.

Таким образом, целью исследования является экспериментальное моделирование напряженно-деформированного состояния объемных прессовок, получаемых из порошковых модельных композиций на основе воскообразных материалов.

В рамках поставленной цели в работе решались следующие задачи:

– исследование влияния состава модельной порошковой композиции на основе воскообразного материала и кубической упаковки его компонентов на напряженно-деформированное состояние объемной прессовки в процессе одностороннего уплотнения в закрытой пресс-матрице;

– определение возможности управления размерно-геометрическими параметрами конечной прессовки из модельной порошковой композиции, получаемой в процессе одностороннего уплотнения.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для экспериментального моделирования в качестве основы порошковых модельных композиций выбраны воскообразные материалы марок Т1 (парафин очищенный) и ПС50/50 (сплав парафина и стеарина в соотношении 1:1). Использование этих материалов обусловлено практической целесообразностью, поскольку они являются наиболее распространенными для реализации процессов ЛВМ и соответствуют первой классификационной группе [5]. Реальные характеристики используемых в исследовании материалов могут быть отличными от регламентированных ГОСТами, поэтому определены экспериментально [18]: для Т1 плотность  $\rho = 0,86$  г/см<sup>3</sup>, модуль Юнга  $E = 81,91$  МПа; для ПС 50/50  $\rho = 0,935$  г/см<sup>3</sup> и  $E = 71,8$  МПа соответственно.

Фракция воскообразного материала зависит от метода его получения и представляет собой частицы в виде хлопьев или гранул. При описании процессов прессования порошковых сред ряд ученых, исследующих процессы порошковой металлургии, принимают модель механизма деформирования тела, состоящего из сферических элементов, взаимодействующих между собой за счет сил трения [25]. В настоящем эксперименте для визуализации процесса формирования объемных прессовок из материалов Т1 и ПС50/50 изготовлены и использованы сферические элементы диаметром 10 мм. Сферические элементы получены заливкой расплавов воскообразных материалов в пресс-форму. Значение плотности каждого отдельного воскообразного элемента соответствовало плотности материала в литом состоянии.

При моделировании процесса уплотнения модельных композиций с растворимыми компонентами последние принимаются упругими (недеформируемыми). Для их имитации использованы шарики диаметром 10 мм, выполненные из стали 45, свойства которой регламентированы ГОСТ 1050-2013 «Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия». В качестве характеристик этого материала отметим, что его модуль Юнга составляет  $E = 210$  ГПа, а плотность  $\rho = 7810$  кг/м<sup>3</sup>. Пресс-форма также выполнена из стали 45. Принимаемое в

### Начальные условия формирования прессовок

#### Initial conditions for the compacts formation

Вариант размещения элементов согласно рис. 1	Кубическая упаковка воскообразных элементов		Кубическая упаковка модельной композиции с содержанием упругих элементов, %					
			20		30		50	
Материал элементов	T1	ПС 50/50	T1	ПС 50/50	T1	ПС 50/50	T1	ПС 50/50
Объем уплотняемого тела, см <sup>3</sup>	225,0	225,0	201,6	201,6	190,2	190,2	166,8	166,8
Начальная плотность композиции из воскообразных элементов*, кг/м <sup>3</sup>	477,8	515,6	428,6	464,3	386,8	431,9	322,3	349,2
Число воскообразных элементов в пресс-матрице	225	225	180	180	158	158	112	112
Доля объема, занимаемого воскообразными элементами в пресс-форме, %	52,0	52,0	41,6	41,6	36,5	36,5	25,8	25,8

\* В случае, когда экспериментальная модельная композиция состоит из смеси воскообразных и стальных сферических элементов, объем последних не учитывается, так как они в ходе уплотнения не деформируются.

эксперименте допущение, согласно которому в ходе исследования деформация материала пресс-формы и стальных сферических элементов отсутствует, не снижает достоверность результатов.

На рис. 1 представлена принципиальная схема осуществления процесса формирования тела пористой выплавляемой модели в форме куба со стороной, равной 50 мм. Последовательность экспериментальной формовки следующая: на основание 1 пресс-формы устанавливается ее формообразующая часть 2, внутрь которой помещаются сферические элементы модельной композиции дозой в количестве, указанном в таблице. Здесь также указана начальная плотность композиции для всех вариантов упаковки воскообразных элементов. В процессе уплотнения порошковое тело проходит три основные стадии [26]:

- структурная деформация, связанная с перераспределением и уплотнением частиц и характеризующаяся ростом нагрузки при перемещении пуансона;

- рост давления прессования без увеличения плотности прессовки;

- пластическая деформация, охватывающая весь объем каждой частицы уплотняемого порошкового тела при отсутствии смещения межчастичных контактов.

Практический интерес представляет характеристика процесса уплотнения, описываемая зависимостью деформации материала от нагрузки. С целью исключения первой стадии уплотнения порошкового тела в эксперименте сферические элементы размещали в пресс-форме в кубическом порядке, как показано на рис. 1. Такой вариант начальной упаковки частиц материала обеспечивает имитацию условий, характерных для второй стадии уплотнения, при которой каждый элемент порошкового тела в момент нагружения «контактирует» по шести точкам. Для моделирования процесса деформирования композиций на основе воскообразных материалов, содержащих 20, 30 и 50 % растворимых

компонентов, сферические воскообразные и стальные упругие элементы также укладывали в кубическом порядке (рис. 1, б). Темным цветом на рис. 1, б выделены упругие недеформируемые элементы, выполненные из стали 45. В отличие от известных методов моделирования процессов деформирования пористых тел из однородных материалов и получения прессовки с характерной анизотропией свойств [27, 28] или моделей процессов уплотнения порошковых материалов с отно-

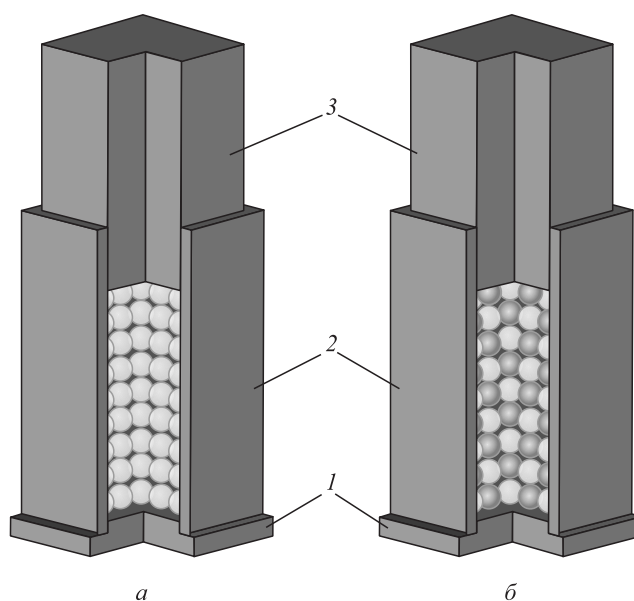


Рис. 1. Схема размещения элементов воскообразной модельной композиции в пресс-форме при формировании прессовки: а – кубическая упаковка воскообразных сферических элементов; б – кубическая упаковка композиции, состоящей из воскообразных и стальных сферических элементов в соотношении 50/50

Fig. 1. Diagram of elements of the waxy model mixture in the mold during the compact formation: а – cubic packing of the spherical elements; б – cubic packing of the mixture consisting of wax and steel spherical elements in ratio of 50/50

сительно более пластичными единичными включениями [29], в представляемом авторами эксперименте роль будущей поры в прессовке играет более упругое тело. Таким образом, при прессовании растворимый элемент представляет собой упругое недеформируемое включение, которое после формирования прессовки подвергается растворению, образуя пору.

По завершении компактования сферических элементов в пресс-форму последняя устанавливалась на рабочий стол универсальной тестовой машины AGX plus Shimadzu. Серией предварительных исследований установлено, что в ходе уплотнения воскообразных порошковых тел по достижении значения деформации 10 % и более на характер изменения значений напряжений существенное влияние оказывает скорость перемещения пресс-пуансона. Таким образом, чем выше скорость перемещения пресс-пуансона при уплотнении шаровидных воскообразных элементов модельного материала, тем значения напряжений будут больше. В этой связи в настоящем эксперименте выбрана наиболее приемлемая скорость перемещения подвижной траверсы тестовой машины AGX plus Shimadzu, равная 0,5 мм/с, что обеспечивает относительно равномерный процесс уплотнения порошкового тела. Скорость перемещения пресс-пуансона менее 0,5 мм/с представляется технологически нецелесообразной, а ее превышение повысит вероятность появления визуально определяемого «фронта» уплотнения и, как следствие, получение прессовки с неравномерным упругим откликом по ее периферии. Характеристики точности хода и нагружения устройства AGX plus Shimadzu обеспечивают достаточную достоверность экспериментальных результатов при фактическом отклонении не более 0,03 % в интервале значений нагрузки от 0 до 100 кН и деформации от 0 до 10 мм. Температура воздуха в помещении составляла 21 °С.

На основании данных, полученных с тестовой машины AGX plus Shimadzu, строились экспериментальные кривые уплотнения воскообразных порошковых сред.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Уплотнение моделируемого порошкового тела осуществляли до момента достижения материалом деформируемых воскообразных элементов технологически целесообразного уровня пористости 6 %, отмеченного выше. В результате уплотнения получали прессовку в виде куба со стороной 5 см. Таким образом, плотность конечной прессовки из материала Т1 составляла 0,808 г/см<sup>3</sup>, а материала ПС 50/50 – 0,879 г/см<sup>3</sup> соответственно.

Из результатов серии предварительных исследований известно, что использованные в настоящем эксперименте воскообразные материалы характеризуются относительно высоким пределом текучести в сравне-

нии с пределом прочности на сжатие [18, 30, 31]. Это обстоятельство определяет характер процесса прессования, отличающийся от идеального случая уплотнения порошков в закрытой пресс-матрице тем, что график «напряжение – деформация» не имеет трех четких последовательных стадий (структурная деформация уплотняемой системы, рост давления прессования без увеличения плотности прессовки и фаза пластической деформации, распределяющейся на весь объем прессовки), а происходит взаимное наложение стадий процесса прессования или их одновременное течение.

В связи с отмеченным выше, целесообразной представляется визуализация экспериментальных результатов в виде полиномиальных зависимостей третьего порядка, отражающих взаимосвязь роста напряжения на пресс-пуансоне и значения относительной деформации уплотняемого порошкового тела (рис. 2, 3). Представленная на рис. 2 кривая экспериментальной зависимости 1 характеризует процесс уплотнения сферических элементов из воскообразной композиции на основе материала Т1 до достижения прессовкой значения пористости 6 %. Аналогично предыдущей, кривая 2, соответственно, характерна для процесса уплотнения сферических элементов из воскообразной композиции на основе материала марки ПС 50/50. Символы  $R_{(1-2)}^2$  – величины достоверности аппроксимации полиномиальных зависимостей для сферических элементов из материалов Т1 и ПС 50/50 и условий их начальной кубической упаковки.

Анализ представленных на рис. 2 зависимостей показывает, что для формирования объемной пресс-

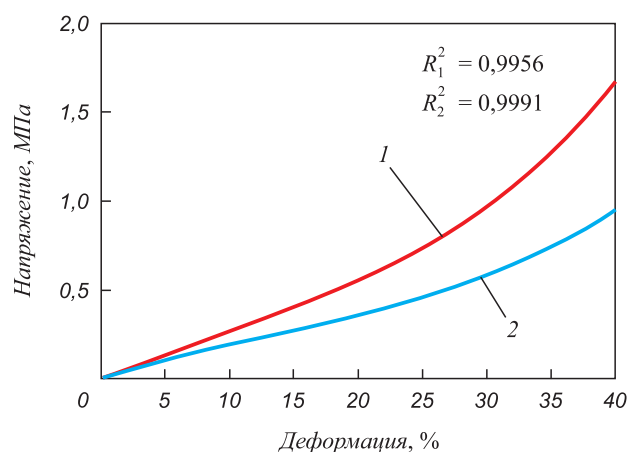


Рис. 2. Полиномиальные зависимости напряжения от деформации, полученные в ходе уплотнения элементов модельного материала, имеющих кубический порядок начальной упаковки в пресс-форме:

1 – для прессовок из материала Т1; 2 – для прессовок из материала ПС 50/50

Fig. 2. Polynomial dependences of stress on deformation, obtained during compaction of elements of model material with cubic order of initial packing in the mold:

1 – for the compact of T1 material; 2 – for the compact of PS 50/50 material

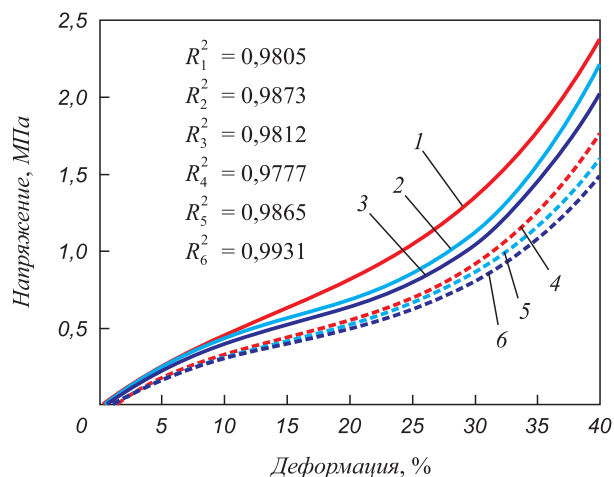


Рис. 3. Полиномиальные зависимости напряжения от деформации, полученные в ходе уплотнении смеси из упругих стальных и воскообразных элементов из модельного материала, имеющих кубический порядок начальной упаковки в пресс-форме: 1, 2, 3 – для прессовок из материала Т1 с содержанием упругих элементов 50, 30 и 20 % соответственно; 4, 5, 6 – для прессовок из материала ПС 50/50 с содержанием упругих элементов 50, 30 и 20 % соответственно

Fig. 3. Polynomial dependences of stress on deformation, obtained during compaction of the mixture of elastic steel and waxy elements from the model material with cubic order of initial packing in the mold:

1, 2, 3 – for the compacts of T1 material containing 50, 30 and 20 % of elastic elements, correspondingly; 4, 5, 6 – for the compacts of ПС 50/50 material containing 50, 30 and 20 % of elastic elements, correspondingly

совки пористостью 6 % из Т1 достаточным является напряжение 1,7 МПа, в то время как для прессовки из ПС 50/50 требуется еще меньшее напряжение, не превышающее 1 МПа. Такое различие в нагрузках, требуемых для формирования прессовок из материалов Т1 и ПС 50/50, объясняется, по видимому, различием физических свойств материалов, а именно их плотности и температуры плавления. Очевидно, что процесс прессования порошкового тела с большей насыпной плотностью будет характеризоваться и большими значениями напряжений. В процессе уплотнения в результате роста нагрузки на уплотняемое порошковое тело и, как следствие, механической диссипации, происходит оплавление элементов порошкового тела в зонах их контакта (и появление локальных участков жидкой фазы). Экспериментально, при помощи дифференциально-термического анализатора Shimadzu DTG-60Н, в ходе нагрева материалов со скоростью 2 °С/мин определено, что температура плавления Т1 составляет 60 °С, а материала марки ПС 50/50 – 52 °С соответственно [9]. Отмеченные выше различия в физических параметрах материалов, использованных в эксперименте, объясняют более высокие пластические свойства материала ПС 50/50 и, как следствие, меньшие значения нагрузки, необходимые для формирования прессовки требуемой плотности.

Соответственно для достижения прессовкой из гетерогенных материалов на основе Т1 или ПС 50/50 значений пористости, превышающих 6 %, значения нагрузок будут ниже, и могут быть определены из графиков, представленных на рис. 2. Это обстоятельство обуславливает невысокие требования к прочности пресс-формы, что определяет перспективы для реализации процесса в производственных условиях.

При формировании прессовок с водорастворимыми компонентами значения напряжений, возникающих в ходе уплотнения гетерогенных порошковых материалов, будут значительно выше. На рис. 3 представлены полиномиальные зависимости напряжения от деформации, полученные в ходе уплотнения смеси из упругих стальных и воскообразных элементов из модельного материала, имеющих, как и в случае с однородными материалами, кубический порядок начальной упаковки в пресс-форме.

Из анализа рис. 2, 3 видно, что напряжения, возникающие при прессовании воскообразной части модельной композиции до значений деформации 40 %, существенно превосходят по значению напряжения, требующиеся для уплотнения однородных воскообразных материалов при тех же значениях деформации. Так, например, для формирования прессовки из однородной композиции ПС 50/50 до уровня деформации 36,5 %, что соответствует значению пористости 10 %, характерно значение напряжения 0,8 МПа. Для процесса прессовки композиции на основе ПС 50/50, содержащей 20 % упругих элементов, значения напряжений для такого уровня деформаций составляют уже 1,25 МПа. Таким образом, сопоставление данных, представленных на рис. 2 и 3, позволяет оценить различие напряжений, характерных для любой стадии деформирования уплотняемого тела, состоящего из однородных и гетерогенных материалов. Очевидно, что для случая с однородными материалами фронт уплотнения продвигается равномерно по всей площади прессовки в направлении оси прессования. При формировании прессовки из композиции, содержащей упругие недеформируемые элементы, последние рассеивают фронт уплотнения, что приводит к росту напряжений при формировании прессовки и, как следствие, определяют рост значений упругого последействия уплотненного материала после снятия нагрузки.

В результате ряда исследований, предшествующих настоящей работе, установлена предпочтительность выдержки уплотненного материала под нагрузкой после завершения его пластической деформации. Такой подход позволяет снизить величину упругого последействия материала экспериментальных прессовок как за счет снижения температуры прессовки, так и за счет релаксации напряжений в результате локального перераспределения плотности и релаксации материала. О снижении напряжений судили по результатам выдержки материала под нагрузкой, осуществляемого при помо-

щи тестовой машины AGX plus Shimadzu. В результате эксперимента установлено, что значения напряжений в воскообразном материале, пребывающем под нагрузкой, когда формообразующие поверхности пресс-матрицы находятся в сомкнутом состоянии, снижаются более, чем на 90 % уже к восьмой минуте выдержки для материала Т1 и к четвертой минуте для материала ПС 50/50.

Фиксация конечных размеров прессовки осуществлялась в двух плоскостях по центру поперечного сечения и по вертикали при помощи цифрового регистратора DIN 863 Vogel, обеспечивающего точность измерения 0,001 мм. Отклонение значений размеров прессовки в местах измерений от внутренних размеров соответствующих частей пресс-формы в положительную или отрицательную сторону позволяет регистрировать упругий отклик или усадку материала. Величину таких отклонений можно определить по формуле

$$O = \left( \frac{A_{\text{внут}} - A_{\text{внеш}}}{A_{\text{внеш}}} \right) 100 \%,$$

где  $O$  – величина отклонения, %;  $A_{\text{внут}}$  и  $A_{\text{внеш}}$  – контролируемые размеры внутренней полости пресс-формы и внешнего размера прессовки соответственно, мм.

В результате эксперимента установлено, что для релаксации напряжений (в интервале 0,95 ÷ 1,65 МПа), характерных для процесса уплотнения сферических элементов воскообразных материалов марок Т1 и ПС 50/50 до пористости 6 %, время выдержки прессовки под нагрузкой составляет 8 – 12 мин. Это позволяет обеспечить величину  $O$  (отклонения значений размеров прессовки от внутренних размеров соответствующих частей пресс-формы) в интервале значений 0,05 – 0,01 %. В результате эксперимента установлено, что для релаксации напряжений (в интервале 1,45 ÷ 2,35 МПа), характерных для процесса уплотнения композиций, состоящих из сферических элементов воскообразных материалов марок Т1, ПС 50/50 и упругих недеформируемых сферических элементов (в количестве от 20 до 50 %) до значений пористости 6 %, время выдержки прессовки под нагрузкой не превышает 7 мин. Это позволяет обеспечить величину  $O$  в интервале значений, сопоставимых со значениями, характерными для прессовок из однородных материалов. Установлено, что увеличение содержания недеформируемых элементов в модельных композициях, имитирующих водорастворимые компоненты, позволяет ускорить релаксацию прессовки. Безусловно, физические свойства реальных растворимых компонентов отличаются от имитирующих их

стальных элементов и эффект снижения времени релаксации будет не таким значительным. Однако повышение конструкционной прочности такой прессовки и ее геометрических параметров позволяют расширить область применения экспериментального метода в промышленных условиях.

## Выводы

При формировании пористой удаляемой модели в условиях отсутствия внешних источников тепла прессованием композиций, состоящих из воскообразных компонентов, значения остаточных напряжений возможно регулировать начальной упаковкой материала в пресс-матрице, скоростью деформирования элементов, входящих в состав композиций, и временем выдержки прессовки под нагрузкой.

Установлено, что формирование объемной прессовки из порошкового тела, содержащего однородный воскообразный материал, характеризующийся большей насыпной плотностью, обуславливает более высокие значения напряжений и, как следствие, более высокие значения упругого последействия. При формировании прессовок с водорастворимыми компонентами значения напряжений, возникающих в ходе уплотнения гетерогенных порошковых материалов, будут значительно выше. Для случая с однородными материалами фронт уплотнения продвигается равномерно по всей площади прессовки в направлении оси прессования. При формировании прессовки из композиции, содержащей упругие недеформируемые элементы, последние рассеивают фронт уплотнения, что приводит к росту напряжений при формировании прессовки и, как следствие, определяют рост значений упругого последействия уплотненного материала после снятия нагрузки. Несмотря на более высокие значения напряжений, возникающих при уплотнении гетерогенных порошковых тел, их релаксация наступает раньше, чем у прессовок, полученных из порошков однородных материалов, что, по-видимому, объясняется изменением роста скорости охлаждения материала после деформации.

Относительно невысокие значения напряжений при формировании прессовок из однородных и гетерогенных материалов обуславливают невысокие требования к прочности пресс-формы, что, в свою очередь, определяет перспективы для реализации процесса в производственных условиях.

Отличительной чертой разрабатываемых технологических приемов является низкий уровень материальных и энергетических затрат, снижение экологических факторов, связанных с возможной их реализацией в промышленных условиях [32].



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## REFERENCES

- Zhou L., Xu J.F., Xu X.B. Construction of scientific evaluation system for energy saving and emission reduction oriented to product full life-cycle // *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vol. 291–294. P. 693–695.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.291-294.693>
- Kim S.K. Effect of product quality on life cycle assessment in aluminum die casting process // *Materials Science Forum*. 2007. Vol. 544–545. P. 259–262.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.544-545.259>
- Sata A., Ravi B. Bayesian inference-based investment-casting defect analysis system for industrial application // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. Vol. 90. No. 9–12. P. 3301–3315. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9614-0>
- Rodriguez A., López de Lacalle L.N., Calleja A., Lamikiz A.F. Maximal reduction of steps for iron casting one-of-a-kind parts // *Journal of Cleaner Production*. 2012. Vol. 24. P. 48–55.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.11.054>
- Литье по выплавляемым моделям / Под. общ. ред. В.А. Озерова. 4-е изд., перераб. и доп. Москва: Машиностроение, 1994. 448 с.
- Zhilin S.G., Komarov O.N., Bogdanova N.A. Production of the steel casting with improved dimensional and geometrical accuracy using complex models // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020. Vol. 709. No. 3. Article 033104.  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/3/033104>
- Vidyarthi G., Gupta N. New development in investment casting process // *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2017. Vol. 8. No. 12. P. 529–540.
- Сапченко И.Г., Жилин С.Г., Комаров О.Н. Управление структурой и свойствами пористых комбинированных удаляемых моделей. Владивосток: Дальнаука, 2007. 137 с.
- Жилин С.Г., Богданова Н.А., Комаров О.Н. Влияние гранулометрического состава и скорости выдавливания воскообразной композиции на геометрию длинномерной прессовки при мундштучном экструдировании // *Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния*. 2018. № 4 (38). С. 54–64.
- Foggia M.D., D'Addona D.M. Identification of critical key parameters and their impact to zero-defect manufacturing in the investment casting process // *Procedia CIRP*. 2013. Vol. 12. P. 264–269.  
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.09.046>
- Дубровин В.К., Заславская О.М., Карпинский А.В. Производство отливок из цветных сплавов в объемные формы по выплавляемым моделям // *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2011. № 2. С. 34–39.
- Abualigah L., Abd Elaziz M., Khasawneh A.M., Alshinwan M., Ibrahim R.A., Al-qaness M.A.A., Mirjalili S., Sumari P., Gandomi A.H. Meta-heuristic optimization algorithms for solving real-world mechanical engineering design problems: A comprehensive survey, applications, comparative analysis, and results // *Neural Computing & Applications*. 2022. Vol. 34. P. 4081–4110.  
<https://doi.org/10.1007/s00521-021-06747-4>
- Xu M., Lekakh S.N., Richards V.L. Thermal property database for investment casting shells // *International Journal of Metalcasting*. 2016, vol. 10, no. 3. P. 342–347.  
<https://doi.org/10.1007/s40962-016-0052-4>
- Perry M.C. Investment casting // *Advanced Materials & Processes*. 2008. Vol. 166. No. 6. P. 31–33.
- Pattnaik S., Karunakar D.B., Jha P.K. Developments in investment casting process – A review // *Journal of Materials Processing Technology*. 2012. Vol. 212. No. 11. P. 2332–2348.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.06.003>
- Harun Z., Kamarudin N.H., Badarulzaman N.A., Wahab M.S. Shell mould composite with rice husk // *Key Engineering Materials*. Vol. 471–472. P. 922–927.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.471-472.922>
- Zhou L. Xu J.F., Xu X.B. Construction of scientific evaluation system for energy saving and emission reduction oriented to product full life-cycle. *Applied Mechanics and Materials*. 2013, vol. 291–294, pp. 693–695.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.291-294.693>
- Kim S.K. Effect of product quality on life cycle assessment in aluminum die casting process. *Materials Science Forum*. 2007, vol. 544–545, pp. 259–262.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.544-545.259>
- Sata A., Ravi B. Bayesian inference-based investment-casting defect analysis system for industrial application. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017, vol. 90, no. 9–12, pp. 3301–3315. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9614-0>
- Rodriguez A., López de Lacalle L.N., Calleja A., Lamikiz A.F. Maximal reduction of steps for iron casting one-of-a-kind parts. *Journal of Cleaner Production*. 2012, vol. 24, pp. 48–55.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.11.054>
- Investment Casting*. Ozerov V.A. ed. Moscow: Mashinostroenie, 1994, 448 p. (In Russ.).
- Zhilin S.G., Komarov O.N., Bogdanova N.A. Production of the steel casting with improved dimensional and geometrical accuracy using complex models. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, vol. 709, no. 3, article 033104.  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/3/033104>
- Vidyarthi G., Gupta N. New development in investment casting process. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2017, vol. 8, no. 12, pp. 529–540.
- Sapchenko I.G., Zhilin S.G., Komarov O.N. *The Structure and Properties of Porous Combined Removable Models*. Vladivostok: Dal'nauka, 2007, 137 p. (In Russ.).
- Zhilin S.G., Bogdanova N.A., Komarov O.N. Influence of granulometric composition and extrusion ratio of waxy materials on geometry of extended compact by extruding forming. *Vestnik Chuvashskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. I.Ya. Yakovleva. Seriya: Mekhanika predel'nogo sostoyaniya*. 2018, no. 4 (38), pp. 54–64. (In Russ.).
- Foggia M.D., D'Addona D.M. Identification of critical key parameters and their impact to zero-defect manufacturing in the investment casting process. *Procedia CIRP*. 2013, vol. 12, pp. 264–269.  
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.09.046>
- Dubrov V.K., Zaslavskaya O.M., Karpinski A.V. Casting production from non-ferrous alloys in bulk molds of consumable patterns. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*. 2011, no. 2, pp. 34–39. (In Russ.)
- Abualigah L., Abd Elaziz M., Khasawneh A.M., Alshinwan M., Ibrahim R.A., Al-qaness M.A.A., Mirjalili S., Sumari P., Gandomi A.H. Meta-heuristic optimization algorithms for solving real-world mechanical engineering design problems: A comprehensive survey, applications, comparative analysis, and results. *Neural Computing & Applications*, 2022, vol. 34, pp. 4081–4110.  
<https://doi.org/10.1007/s00521-021-06747-4>
- Xu M., Lekakh S.N., Richards V.L. Thermal property database for investment casting shells. *International Journal of Metalcasting*. 2016, vol. 10, no. 3, pp. 342–347.  
<https://doi.org/10.1007/s40962-016-0052-4>
- Perry M.C. *Investment casting*. *Advanced Materials & Processes*. 2008, vol. 166, no. 6, pp. 31–33.
- Pattnaik S. Karunakar D.B., Jha P.K. Developments in investment casting process – A review. *Journal of Materials Processing Technology*. 2012, vol. 212, no. 11, pp. 2332–2348.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.06.003>
- Harun Z., Kamarudin N.H., Badarulzaman N.A., Wahab M.S. Shell mould composite with rice husk. *Key Engineering Materials*, vol. 471–472, pp. 922–927.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.471-472.922>

17. Жилин С.Г., Сапченко И.Г., Комаров О.Н. Упругий отклик прессовок при деформировании гетерогенных порошковых материалов // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2015. № 4 (26). С. 185–192.
18. Sosnin A.A., Bogdanova N.A., Zhilin S.G., Komarov O.N. Finite element modeling of the stress-strain state of waxy compacts // AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2176. No. 1. Article 030017. <https://doi.org/10.1063/1.5135141>
19. Himran S., Suwono A. Characterization of alkanes and paraffin waxes for application as phase change energy storage medium // Energy Sources Journal. 1994. Vol. 16. No. 1. P. 117–128. <https://doi.org/10.1080/00908319408909065>
20. Ziabicki A. Structure and properties of polymers // AMAS Course of Random Material Microstructures RMM'04. Warsaw. February 2–4. 2004. P. 307–342.
21. Dixit U.S., Joshi S.N., Davim J.P. Incorporation of material behavior in modeling of metal forming and machining processes: A review // Materials & Design. 2011. Vol. 32. No. 7. P. 3655–3670. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.03.049>
22. Nicolaides D.B., Woodcock L.V. The rheology and phase structure of steady uniaxial compaction // Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications. 1997. Vol. 240. No. 1–2. P. 374–395. [https://doi.org/10.1016/S0378-4371\(97\)00160-X](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(97)00160-X)
23. Shtern M.B. Density-pressure dependence and density distribution during powder pressing // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 2014. Vol. 53. No. 3–4. P. 139–147. <https://doi.org/10.1007/s11106-014-9596-0>
24. Aryanpour G., Mashl S., Warke V. Elastoplastic-viscoplastic modeling of metal powder compaction: application to hot isostatic pressing // Powder Metallurgy. 2013. Vol. 56. No. 1. P. 14–23. <https://doi.org/10.1179/1743290112Y.0000000027>
25. Рожкова Г.В., Кусков В.Н., Смолин Н.И. Исследование влияния межчастичных контактов на процесс предварительного прессования порошкового материала // Агропродовольственная политика России. 2017. № 11 (71). С. 140–144.
26. Теория и практика процесса прессования гетерофазных увлажненных механических смесей на основе железа / В.Н. Кокорин, А.И. Рудской, В.И. Филимонов, Е.М. Бульжев, С.Ю. Кондратьев. Ульяновск: УлГТУ, 2012. 236 с.
27. Цеменко В.Н., Фук Д.В., Ганин С.В. Определение реологических характеристик и моделирование процесса экструзии порошковых и пористых материалов. Часть 2. Пористое тело // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2016. № 2(243). С. 134–143.
28. Morvan A., Grosseau-Poussard J.-L., Caillault N., Delange F., Roure S., Lepretre P., Silvain J.-F. Powder processing methodology for fabrication of Copper / Graphite composite materials with enhanced thermal properties // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2019. Vol. 124. Article 105474. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105474>
29. Горохов В.М., Дорошкевич Е.А., Звонарев Е.В. Теоретические основы моделирования упруго-пластического поведения металлических порошков при прессовании в жесткой матрице // 50 лет порошковой металлургии Беларуси. История, достижения, перспективы. Минск, 2010. С. 158.
30. Aleksandrova E.A., Aleksandrov B.L., Krasavtsev B.E. Structural and mechanical properties of paraffin wax composites // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. 2018. Vol. 54. No. 1. P. 37–43. <https://doi.org/10.1007/s10553-018-0895-x>
31. Doudard K., Arhaliass A., Loisel C., Gonçalves O., Legrand J., Saint-Jalmes S., Pouliquen M. A new approach to optimize compression of paraffin materials: influence of particles size and shape // International Journal of Material Forming. 2018. Vol. 11. No. 2. P. 247–256. <https://doi.org/10.1007/s12289-017-1348-5>
32. Сапченко И.Г., Жилин С.Г., Комаров О.Н. Улучшение экологии литья по выплавляемым моделям использованием пористых удаляемых моделей // Безопасность жизнедеятельности. 2009. № 2. С. 29–33.
17. Zhilin S.G., Sapchenko I.G., Komarov O.N. Elastic response of compacts from heterogeneous powder material during deformation. *Vestnik Chuvashskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. I.Ya. Yakovleva. Seriya: Mekhanika predel'nogo sostoyaniya*. 2015, no. 4 (26), pp. 185–192. (In Russ.).
18. Sosnin A.A., Bogdanova N.A., Zhilin S.G., Komarov O.N. Finite element modeling of the stress-strain state of waxy compacts. *AIP Conference Proceedings*. 2019, vol. 2176, no. 1, article 030017. <https://doi.org/10.1063/1.5135141>
19. Himran S., Suwono A. Characterization of alkanes and paraffin waxes for application as phase change energy storage medium. *Energy Sources Journal*. 1994, vol. 16, no. 1, pp. 117–128. <https://doi.org/10.1080/00908319408909065>
20. Ziabicki A. Structure and properties of polymers. *AMAS Course of Random Material Microstructures RMM'04, February 2–4. 2004, Warsaw*, pp. 307–342.
21. Dixit U.S., Joshi S.N., Davim J.P. Incorporation of material behavior in modeling of metal forming and machining processes: A review. *Materials & Design*. 2011, vol. 32, no. 7, pp. 3655–3670. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.03.049>
22. Nicolaides D.B., Woodcock L.V. The rheology and phase structure of steady uniaxial compaction. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*. 1997, vol. 240, no. 1–2, pp. 374–395. [https://doi.org/10.1016/S0378-4371\(97\)00160-X](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(97)00160-X)
23. Shtern M.B. Density-pressure dependence and density distribution during powder pressing. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2014, vol. 53, no. 3–4, pp. 139–147. <https://doi.org/10.1007/s11106-014-9596-0>
24. Aryanpour G., Mashl S., Warke V. Elastoplastic-viscoplastic modeling of metal powder compaction: application to hot isostatic pressing. *Powder Metallurgy*. 2013, vol. 56, no. 1, pp. 14–23. <https://doi.org/10.1179/1743290112Y.0000000027>
25. Rozhkova G.V., Kuskov V.N., Smolin N.I. Influence of inter-particle contacts on preliminary compacting of powder material. *Agroprodovol'stvennaya politika Rossii*. 2017, no. 11 (71), pp. 140–144. (In Russ.).
26. Kokorin V.N., Rudskoi A.I., Filimonov V.I., Bulyzhev E.M., Kondrat'ev S.Yu. *Theory and Practice of Compacting of Iron-Based Heterophase Wet Mechanical Mixtures*. Ul'yanovsk: UISTU, 2012, 236 p. (In Russ.).
27. Tsemenko V.N., Fuk D.V., Ganin S.V. Determining the rheological characteristics and modeling the extrusion of powder and porous materials. Part 2. Porous body. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta*. 2016, no. 2 (243), pp. 134–143. (In Russ.).
28. Morvan A., Grosseau-Poussard J.-L., Caillault N., Delange F., Roure S., Lepretre P., Silvain J.-F. Powder processing methodology for fabrication of Copper. Graphite composite materials with enhanced thermal properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2019, vol. 124, article 105474. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105474>
29. Gorokhov V.M., Doroshkevich E.A., Zvonarev E.V. Theoretical foundations for modeling elastic-plastic behavior of metal powders when compacting in a rigid matrix. In: *50 Years of Powder Metallurgy in Belarus. History, Achievements, Prospects*. Minsk, 2010, p. 158. (In Russ.).
30. Aleksandrova E.A., Aleksandrov B.L., Krasavtsev B.E. Structural and mechanical properties of paraffin wax composites. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2018, vol. 54, no. 1, pp. 37–43. <https://doi.org/10.1007/s10553-018-0895-x>
31. Doudard K., Arhaliass A., Loisel C., Gonçalves O., Legrand J., Saint-Jalmes S., Pouliquen M. A new approach to optimize compression of paraffin materials: Influence of particles size and shape. *International Journal of Material Forming*. 2018, vol. 11, no. 2, pp. 247–256. <https://doi.org/10.1007/s12289-017-1348-5>
32. Sapchenko I.G., Zhilin S.G., Komarov O.N. Improving ecology of investment casting using porous removable patterns. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*. 2009, no. 2, pp. 29–33. (In Russ.).

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Сергей Геннадьевич Жилин**, к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник, Институт машиноведения и металлургии Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения РАН

**ORCID:** 0000-0002-0865-7109

**E-mail:** sergeyzhilin1@rambler.ru

**Нина Анатольевна Богданова**, младший научный сотрудник, Институт машиноведения и металлургии Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения РАН

**ORCID:** 0000-0002-8769-8194

**E-mail:** joyful289@inbox.ru

**Олег Николаевич Комаров**, к.т.н., доцент, директор, Институт машиноведения и металлургии Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения РАН

**ORCID:** 0000-0002-7121-4271

**E-mail:** olegnikolaevitsch@rambler.ru

**Sergei G. Zhilin**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Leading Researcher, Institute of Metallurgy and Mechanical Engineering of Khabarovsk Federal Research Center, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

**ORCID:** 0000-0002-0865-7109

**E-mail:** sergeyzhilin1@rambler.ru

**Nina A. Bogdanova**, Junior Researcher, Institute of Metallurgy and Mechanical Engineering of Khabarovsk Federal Research Center, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

**ORCID:** 0000-0002-8769-8194

**E-mail:** joyful289@inbox.ru

**Oleg N. Komarov**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Director, Institute of Metallurgy and Mechanical Engineering of Khabarovsk Federal Research Center, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

**ORCID:** 0000-0002-7121-4271

**E-mail:** olegnikolaevitsch@rambler.ru

Поступила в редакцию 14.10.2022

После доработки 20.10.2022

Принята к публикации 22.10.2022

Received 14.10.2022

Revised 20.10.2022

Accepted 22.10.2022