

ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ
ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ
ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ И МАТЕРИАЛАХINNOVATION IN METALLURGICAL
INDUSTRIAL AND LABORATORY EQUIPMENT,
TECHNOLOGIES AND MATERIALS

УДК 621.74.045:53.09

DOI 10.17073/0368-0797-2024-5-593-603

Оригинальная статья
Original article

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ УПЛОТНЕНИЯ ВОСКОБРАЗНЫХ ПОРОШКОВ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРЕССОВОК, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ТОЧНОМ ЛИТЬЕ

Н. А. Богданова[✉], С. Г. Жилин

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

✉ joyful289@inbox.ru

Аннотация. Высокие требования, предъявляемые к качеству поверхности и сложности геометрии металлоизделий, конструкций и узлов деталей, получаемых из широкой линейки цветных и черных сплавов, определяют востребованность литья по выплавляемым моделям (ЛВМ) как метода, обеспечивающего номенклатуру изделий ответственного назначения для нужд авиа-, судо-, и машиностроения. К ряду «узких» мест в реализации процессов ЛВМ можно отнести значительное число технологических операций, каждая из которых сопровождается явлениями теплофизической природы, требующих коррекции, что в конечном итоге определяет высокую стоимость литья. Сложность представляют такие явления, как усадка модельного материала, его температурное расширение на стадиях выплавления из керамической формы, определяющее проникновение модельной массы в поры керамики и способное повлиять на появление поверхностных дефектов, химический состав и структуру сплава будущей отливки. На устранение отмеченных недостатков направлен процесс формирования пористой поверхности выплавляемой модели без усадочных дефектов путем прессования порошков воскообразных модельных материалов, что обеспечивает требуемую геометрию прессовок и отсутствие деформационного воздействия на керамику модельного материала на стадии его выплавления. Широкому распространению метода препятствует недостаток сведений об особенностях управления напряжениями в теле прессовки, определяющими величину упругого отклика уплотняемого материала, который на порядок меньше, чем тепловая усадка. В работе представлены результаты экспериментального определения влияния скорости уплотнения порошковых модельных материалов на напряженно-деформированное состояние прессованных выплавляемых моделей, формируемых в закрытой матрице, а также на прочность таких прессовок.

Ключевые слова: экспериментальное моделирование, машиностроительные процессы, литье по выплавляемым моделям, напряженно-деформированное состояние, прессовка, пористость, упругий отклик, прочность

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Института машиноведения и металлургии Хабаровского Федерального исследовательского центра ДВО РАН. В работе использованы фото Фирсова С.В.

Для цитирования: Богданова Н.А., Жилин С.Г. Влияние режимов уплотнения воскообразных порошков на напряженно-деформированное состояние прессовок, применяемых в точном литье. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2024;67(5):593–603.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-5-593-603>

INFLUENCE OF COMPRESSION MODES OF WAXY POWDERS ON STRESS-STRAIN STATE OF COMPACTS USED IN PRECISION CASTING

N. A. Bogdanova[✉], S. G. Zhilin

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)

✉ joyful289@inbox.ru

Abstract. The high demands placed on the surface quality and geometric complexity of metal products, structures and parts produced from a wide range of non-ferrous and ferrous alloys determine the demand for investment casting as a method that provides a range of critical products for the needs of aircraft, ship building and mechanical engineering industries. A number of “bottlenecks” in the implementation of investment casting processes include a significant number of technological operations, each of them is accompanied by phenomena of a thermophysical nature that require

correction, and it ultimately determines the high cost of casting. The difficulties arise from phenomena such as shrinkage of the pattern material, its thermal expansion during melting from a ceramic mold, which determines penetration of pattern mass into ceramic pores and can affect the appearance of surface defects, the chemical composition and structure of the alloy of future casting. The process of forming a porous surface on wax patterns without shrinkage defects by pressing powders of waxy materials is aimed at eliminating the noted shortcomings, which ensures the required geometry of the compacts and absence of deformation effects on ceramics of the model material at the stage of its melting. Widespread use of the method is hampered by the lack of information about the features of stress control in the compact body determining the magnitude of elastic response of the compacted material, which is an order of magnitude less than thermal shrinkage. The paper presents the results of an experimental study of influence of the compression rate of powder materials on the stress-strain state of pressed wax patterns formed in a closed matrix, as well as on the strength of these compacts.

Keywords: experimental modeling, mechanical engineering processes, investment casting, stress-strain state, pressing, porosity, elastic response, strength

Acknowledgements: The work was performed within the framework of a state assignment of the Khabarovsk Federal Research Center, Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. The authors used photos by Firsov S.V.

For citation: Bogdanova N.A., Zhilin S.G. Influence of compression modes of waxy powders on stress-strain state of compacts used in precision casting. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2024;67(5):593–603. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-5-593-603>

ВВЕДЕНИЕ

Современной особенностью функционирования промышленных предприятий, специализирующихся на выпуске изделий, предназначенных для нужд авто-, авиа- и судостроения является высокий спрос на металлы и рост объемов производства качественных литых изделий с требуемым набором характеристик, обуславливаемый применением энерго- и материалоеффективных технологий [1 – 4].

В отмеченных отраслях важным представляется сокращение издержек на всех этапах технологического цикла формирования литых деталей повышенной точности и сложной конфигурации из широкой номенклатуры сплавов [5].

Одним из востребованных методов получения точных литых заготовок из широкой номенклатуры конструкционных сталей и сплавов является литье по выплавляемым моделям (ЛВМ), получение сложной конфигурации изделий в котором обеспечивается возможностью объединения отдельных деталей в цельнолитые узлы [6; 7]. Универсальность такого метода обеспечивает его использование как для получения тонкостенных отливок относительно небольшой массы, так и для литых изделий с линейными размерами до 500 мм [8 – 10].

Поверхность такой отливки может быть выполнена с шероховатостью до $R_a = 1,25$ мкм, соответствовать 11 – 16 квалитетам при допусках на размеры рабочей полости пресс-формы не более 8 – 9 квалитетов согласно ГОСТ 25347–82 «Основные нормы взаимозаменяемости. Единая система допусков и посадок. Поля допусков и рекомендуемые посадки».

Как и любая технологическая последовательность, ЛВМ имеет свои недостатки, во многом обусловленные большим числом операций, характеризующаяся определенной долей неисправимого брака, который в сумме приводит к росту стоимости конечного продукта, сложности расчета и моделирования результатов реализации процессов ЛВМ [11].

Наибольшее распространение в процессах ЛВМ получила следующая последовательность операций [12]:

– изготовление выплавляемых моделей и элементов литниково-питающей системы запрессовкой расплава (или пасты) модельной композиции в соответствующую пресс-форму с последующей сборкой всех элементов в модельные блоки;

– послойное нанесение на модельный блок и сушка керамической оболочки;

– выплавление материала модельного блока из керамической оболочковой формы с дальнейшей ее прокалкой и заливкой расплавом металла.

Существенную проблему представляет негативное влияние теплофизических явлений, представляющих изменение объема материалов в результате их теплового расширения или усадки, сопровождающих значительную часть отмеченных выше технологических операций. Борьба с усадочными дефектами, характерными для процессов ЛВМ, проявляющимися как в сплавах тела отливки [13; 14], так и на стадии получения восковой выплавляемой модели [15; 16], определяет ряд технологических проблем, решение которых преимущественно сводится к обеспечению узкого интервала температуры заливки и контроля условий затвердевания как жидкого металла, так и расплава модельной массы.

Так, на этапе охлаждения восковой массы при формировании выплавляемой модели величина объемной усадки может достигать 14 % и проявляться на поверхности в виде раковин, складок, волнистости, что требует затрат на исправление такого рода дефектов [17]. Предотвратить появление подобных дефектов удается лишь отчасти за счет оптимизации процессов на стадии проектирования, строго контроля температуры запрессовки модельных масс и улучшения их составов, что позволяет снизить значение коэффициента термического расширения [18 – 21]. Нарушение геометрии литья возможно также ввиду низкой смачиваемости поверхности выплавляемой модели материалами формирующейся керамической оболочки [22]. Тепловое расширение нагреваемого во время выплавления модельного материала из оболочки также является причиной нарушения целостности последней [23]. Проблему низкой стойкости керамики к образованию

трещин иногда удается решить путем ее армирования различными материалами и вставками [24]. После формирования требуемой толщины керамики оболочковые формы нередко подвергают процедуре депарафинизации, осуществляемой посредством их помещения в автоклав. Эта операция также несет определенные риски повреждения внутренних слоев ввиду теплового расширения модельного материала, проникающего в поры керамики на стадии выплавления [25]. Остатки воскового материала в слоях керамики могут повлиять на формирование структуры и свойств поверхности отливки. Отмеченные проблемы приводят к необходимости увеличения припусков на механическую обработку, провоцируя повышенный расход металла.

Сотрудниками лаборатории проблем создания и обработки материалов и изделий Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения РАН предлагается комплексное решение отмеченных выше проблем, связанных с тепловым расширением модельных материалов. Оно заключается в формировании выплавляемых моделей целиком или их поверхности (при получении выплавляемых моделей биметаллических отливок, когда ее поверхность формируется напрессовкой порошка модельного состава на стальной каркас) путем холодного прессования фракций воскообразных модельных материалов. Это позволяет получить структуру прессовки с пористостью до 12 %, конфигурация наружной поверхности которой соответствует формообразующей полости пресс-формы [26; 27].

Такой вариант формирования выплавляемых моделей обеспечивает возможность проникновения модельного материала в сложные формообразующие полости пресс-матрицы и требуемую плотность участков прессовки [28; 29]. Прессованные выплавляемые модели отличает отсутствие таких литейных дефектов, как усадка, волнистость, нарушение геометрии. На стадии выплавления из керамики такие модели не деформируют оболочку, модельный материал не проникает в ее структуру, обеспечивая трещиностойкость последней. Отсутствие модельного материала в порах керамики обеспечивает прогнозируемую структуру и свойства поверхности итоговой отливки.

Недостатком представленного процесса является вероятность изменения размеров прессовки, обусловленная разгрузкой модельного материала и вытеснением воздуха, стесненного в ходе уплотнения. Величина упругого отклика материала прессовки после снятия нагрузки в направлении оси прессования может достигать 0,7 – 1,2 %, а в поперечном направлении 0,4 – 0,5 %, что безусловно существенно меньше значений объемной усадки и требует разработки специального подхода к устранению этого явления [30]. Механическая прочность пористых прессованных выплавляемых моделей уступает традиционным, но компенсируется более высокой теплоустойчивостью.

Величина упругой разгрузки уплотняемого материала во многом зависит от его реологических характеристик: упругости, пластичности, прочности, вязкости и т. д. При уплотнении пластичного порошкового тела без внешних источников тепла в локальных участках материала прессовки происходит повышение температуры, следовательно снижение значений упругой разгрузки материала зависит как от скорости его уплотнения, так и от времени релаксации напряжений [31; 32]. В связи с отмеченным выше, получение прессованных выплавляемых моделей или их элементов с прогнозируемыми размерами и минимальными искажениями геометрии относительно полости пресс-матрицы представляется актуальной задачей при прессовании порошков воскообразных модельных материалов.

В предшествующих работах [33; 34] рассматривались варианты решения ряда вопросов, связанных с режимами формирования прессовок, обеспечивающими достижение релаксации напряжений в них и, как следствие, меньшую величину упругого последствия уплотненного материала. Рассмотрение комплексного влияния скоростных режимов уплотнения воскообразных порошковых материалов в закрытой пресс-матрице на напряженно-деформированное состояние прессовок, а также на итоговую прочность прессовок и характер их разрушения предлагается впервые.

Таким образом, целью настоящей работы является определение влияния скорости перемещения пресспуансона при деформировании порошковых тел, состоящих из воскообразных модельных материалов, на напряженно-деформированное состояние прессовок, формируемых в закрытой матрице.

В рамках поставленной цели в работе решались следующие задачи:

– экспериментальное определение зависимостей напряжений, сопровождающих стадии уплотнения и разгрузки прессовок с пористостью 0 – 10 % от времени при различных скоростях перемещения пресспуансона и фракций порошковых воскообразных материалов;

– экспериментальное получение зависимостей пределов прочности на сжатие от пористости образцов, сформированных из фракций порошковых воскообразных материалов при различных скоростях перемещения пресспуансона, и оценка влияния условий формирования прессовок на характер их разрушения.

МЕТОДЫ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе выполнения экспериментальной части работы, связанной с формированием прессовок и регистрацией напряжений при их прессовании и разрушении, достоверность значений определяемых напряжений позволило обеспечить использование тестовой машины AG-X plus Shimadzu, к заявленным (регламентированным производителем) характеристикам которой относится величина допустимого отклонения значений

0,03 % при нагрузке 100 кН и деформации 10 мм. На рис. 1. представлены рабочая зона тестовой машины, заключенная между неподвижной нижней опорой 1 с размещенной на ней пресс-матрицей 2 (которая снабжена пуансоном), и перемещающимся штоком 3. Пресс-матрица выполнена из стали 45 в виде полого глухонного цилиндра с внутренним диаметром $d = 44$ мм и толщиной стенок 4 мм, что позволяет в рамках данного эксперимента принять ее недеформируемой. Полость пресс-матрицы заполняли рассчитанной дозой порошка воскообразного материала, требующегося для каждого эксперимента. Для решения экспериментальных задач в работе в качестве воскообразных порошков использованы материалы, широко распространенные в ЛВМ-процессах, соответствующие первой классификационной группе модельных составов [6]:

– парафин очищенный марки Т1, имеющий температуру плавления 60 °С и плотность в литом состоянии $\rho_{Т1} = 0,86$ г/см³;

– ПС50/50 (представляющий собой сплав парафина и стеарина в соотношении 1/1), имеющий температуру плавления 52 °С и плотность в литом состоянии $\rho_{ПС50/50} = 0,935$ г/см³.

Важное значение для достоверности экспериментальных данных имеют такие параметры материалов, как температура плавления и плотность в литом состоянии, значения которых несколько отличаются от значений характеристик, регламентированных требованиями соответствующих ГОСТов (например, ГОСТ 23683–89 «Парафины нефтяные твердые. Технические условия») и определены экспериментально. Температуру

плавления Т1 и ПС50/50 предварительно определяли при помощи дифференциально-термического анализатора Shimadzu DTG-60Н в ходе нагрева указанных материалов со скоростью 2 °С/мин [17]. Поскольку используемые в исследованиях материалы являются легкоплавкими, то эксперимент осуществляли в условиях, отвечающих температуре окружающей среды 20 ± 2 °С. Используемые в эксперименте порошковые фракции указанных выше воскообразных материалов получены рассевом на ситах модели 026 в технологически предпочтительном диапазоне стандартных значений $0,63 - 2,5$ мм [33]. Применение меньших фракций нецелесообразно ввиду высокой склонности материала к слеживанию, а использование фракций более $2,5$ мм в ряде случаев может привести к образованию «арок» во внутренних участках пресс-форм сложной конфигурации, неравномерному распределению материала и, как следствие, получению прессовок с зонами локального переуплотнения. Значения насыпной плотности $\rho_{нас}$ зависят от вида и фракции материалов и составляют: для Т1 фракции $2,5$ мм $\rho_{нас} = 0,360$ г/см³; для Т1 фракции $0,63$ мм $\rho_{нас} = 0,320$ г/см³; для ПС50/50 фракции $2,5$ мм $\rho_{нас} = 0,340$ г/см³; для ПС50/50 фракции $0,63$ мм $\rho_{нас} = 0,310$ г/см³.

Для снижения влияния трения материала о внутреннюю поверхность пресс-матрицы на значения напряжений, возникающих при уплотнении, формирующую полость последней обрабатывали керосином. Равномерность распределения материала в объеме порошкового тела, помещенного в пресс-матрицу, достигалась его предварительной утряской в течение 5 мин при частоте $3,5$ Гц. По завершении утряски производилось уплотнение экспериментальных материалов при значениях скорости движения пресс-пуансона $0,5$ мм/с и $1,5$ мм/с, обеспечиваемых перемещением траверсы универсальной испытательной машины AG-X plus Shimadzu. В результате одноосного перемещения пуансона в нижней части пресс-матрицы формировали прессовку, конечные размеры которой удовлетворяют условию: $d = h = 0,44$ м (где h – конечная высота прессовки).

Доза порошка воскообразного материала определялась конечной пористостью прессовок, которая в эксперименте изменялась с шагом 2 % в диапазоне значений $0\% \leq P \leq 10\%$, что обуславливается механическими характеристиками прессовок. Так, например, в ходе предварительных экспериментов установлено, что прессовки с пористостью $P > 10\%$ обладают меньшей прочностью.

Пористость прессовки рассчитывали по формуле

$$P = \left(1 - \frac{\rho_{п}}{\rho_{л}}\right) 100\%, \quad (1)$$

где $\rho_{п}$ – плотность прессованного образца, кг/м³; $\rho_{л}$ – плотность литого материала, кг/м³.

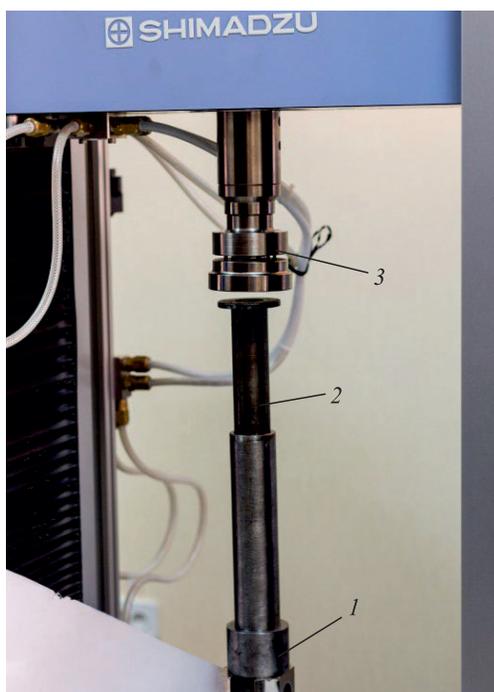


Рис. 1. Пресс-матрица и рабочая зона тестовой машины

Fig. 1. Press matrix and working area of the testing machine

Значения масс и насыпной плотности порошков воскообразных материалов

Values of masses and bulk density of waxy materials powders

Пористость, %	Масса засыпки, г / насыпная плотность, г/см ³	
	T1	ПС 50/50
0	57,51/0,8600	62,52/0,9350
2	56,36/0,8428	61,27/0,9163
4	55,21/0,8256	60,02/0,8976
6	54,06/0,8084	58,77/0,8789
8	52,91/0,7912	57,52/0,8602
10	51,76/0,7740	56,27/0,8415

Очевидно, что прессовки, характеризующиеся значением $\Pi = 0\%$, будут иметь плотность, равную плотности материала в состоянии свободной заливки, что для материалов марок T1 и ПС50/50 соответственно составляет $\rho_{лT1} = 0,86 \text{ г/см}^3$ и $\rho_{лПС50/50} = 0,935 \text{ г/см}^3$.

Массу M дозы порошка воскообразного материала для формирования прессовки требуемой пористости определяли, исходя из условия

$$M = h\rho_{л} \left(1 - \frac{\Pi}{100} \right) \left(\frac{\pi d^2}{4} \right). \quad (2)$$

В таблице представлены значения масс и насыпной плотности порошковых материалов марок T1 и ПС50/50, используемых в эксперименте для формирования прессовок с конечной пористостью, принадлежащей диапазону значений $0\% \leq \Pi \leq 10\%$.

Из данных, представленных в таблице, видно, что значения конечной пористости прессовок, в рассматриваемом случае замкнутых в объеме цилиндрической

полости со значениями диаметра основания и высоты, равными 44 мм, определяют значения масс и насыпной плотности используемых в эксперименте порошковых материалов. Эти обстоятельства в совокупности с фракцией материалов обуславливают разную высоту их засыпки в формообразующей полости пресс-матрицы и, следовательно, различия в значениях деформаций уплотняемых порошковых тел. Таким образом, очевидно, что при равных скоростях перемещения пресс-пуансона время получения прессовок с различным значением конечной пористости будет неодинаковым.

На рис. 2 представлены экспериментальные зависимости деформации порошковых тел, состоящих из материалов T1 и ПС50/50 фракций 0,63 и 2,5 мм, от времени их уплотнения до значений пористости $0\% \leq \Pi \leq 10\%$ при перемещении пресс-пуансона со скоростью 1,5 мм/с (а) и 0,5 мм/с (б). Эти зависимости показаны в различном цветовом исполнении. В таком же цветовом исполнении представлены уравнения, помещенные на графическом поле. При этом для каждой кривой, размещенной на графиках, представленных на рис. 2, характерно убывание значений пористости с 10 до 0% в направлении роста времени уплотнения (т. е. слева направо).

Из рис. 2 видно, что величина деформации уплотняемых порошковых тел для прессовок со всеми значениями пористости не превышает 60%. При этом для более крупных фракций однородных материалов характерны более высокие значения насыпной плотности и, как следствие, несколько меньшие итоговые значения деформации.

По достижении положения h траверсу тестовой машины фиксировали и регистрировали напряжения на ней. Одним из факторов, влияющих на геометрию получаемых пористых выплавляемых моделей, явля-

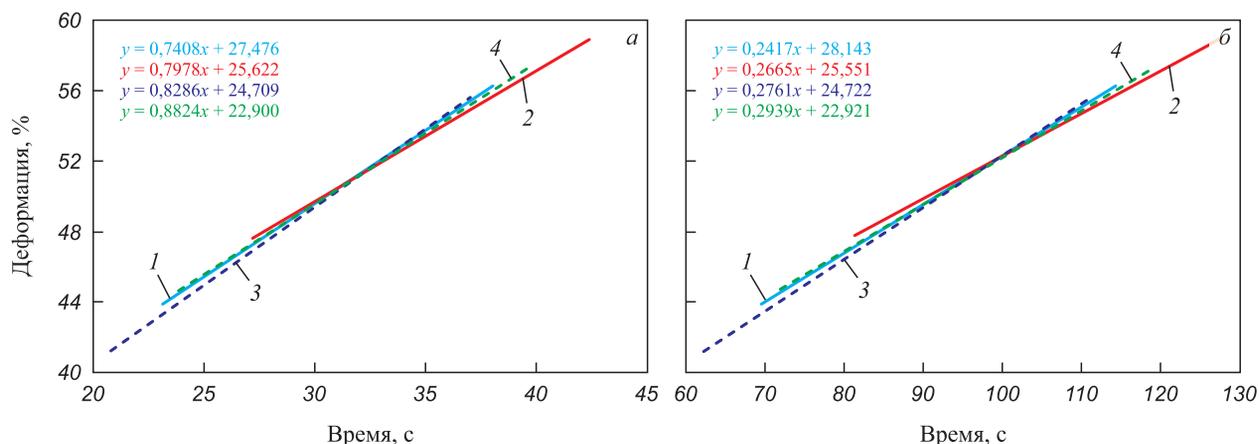


Рис. 2. Зависимости деформации порошкового тела от времени его уплотнения при перемещении пресс-пуансона со скоростью 1,5 мм/с (а) и 0,5 мм/с (б):

1 – T1, фракция 0,63 мм; 2 – ПС50/50, фракция 0,63 мм; 3 – T1, фракция 2,5 мм; 4 – ПС50/50, фракция 2,5 мм

Fig. 2. Dependence of powder body deformation on time of its compaction when moving the press punch at a rate of 1.5 mm/s (a) and 0.5 mm/s (b):

1 – T1, fraction 0.63 mm; 2 – PS50/50, fraction 0.63 mm; 3 – T1, fraction 2.5 mm; 4 – PS50/50, fraction 2.5 mm

ется величина остаточных напряжений в материале прессовки, поэтому после завершения процесса уплотнения образцы выдерживались под нагрузкой при сомкнутых элементах пресс-формы в течение 15 мин. Предварительными экспериментами установлено, что данного количества времени достаточно для релаксации напряжений до 90 % и более [33].

Далее, чтобы определить наибольшие напряжения, соответствующие разрушению образцов, а также характер их разрушения, полученные прессовки подвергались испытанию на сжатие, как показано на рис. 3.

Напряжения, возникающие при определении прочности на сжатие экспериментальных прессованных цилиндрических образцов, также регистрировали при помощи тестовой машины AG-X plus Shimadzu. Поскольку воскообразные порошковые материалы не являются конструкционными, то ввиду отсутствия стандартов на подобного рода испытания с учетом высоты образцов выбрана скорость перемещения траверсы тестовой машины, равная 22 мм/мин, удовлетворяющая требованиям ГОСТ 4651–2014 «Пластмассы. Метод испытания на сжатие».

По полученным в ходе серии экспериментов данным строились зависимости напряжений, сопровождающих стадии уплотнения и разгрузки материала от времени, а также напряжений, возникающих при сжатии в ходе определения прочности, от пористости образцов, сформированных при различных скоростях деформирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Воскообразные модельные композиции, использованные в настоящем эксперименте, обладают относительно высоким пределом текучести [34], что, безусловно, оказывает влияние на характер процесса уплотнения порошкового тела и формирование свойств конечной прессовки. При формовке материалов, обладающих значительной пластичностью, стадии про-



Рис. 3. Размещение экспериментального цилиндрического образца в тестовой машине при испытании на сжатие

Fig. 3. Placing an experimental cylindrical sample in the testing machine during a compression test

цесса прессования протекают одновременно, а участки кривых, которые характеризуют стадии уплотнения, взаимно накладываются друг на друга. Так, в рассматриваемом случае это стадии процесса формовки в закрытой пресс-матрице (характерные для последовательных этапов идеального уплотнения), как структурная деформация порошкового тела, рост давления без увеличения плотности прессовки и следующая за этим пластическая деформация, распределяющаяся на весь ее объем, не имеют четких границ.

В результате эксперимента определены зависимости напряжений, сопровождающих стадии уплотнения и разгрузки прессовок, с итоговыми значениями пористости $\Pi = 0 - 10\%$ от времени формируемых при различных скоростях перемещения пресс-пуансона прессовок из фракций порошковых воскообразных материалов.

На рис. 4 представлены зависимости напряжений, сопровождающих стадии уплотнения до значения

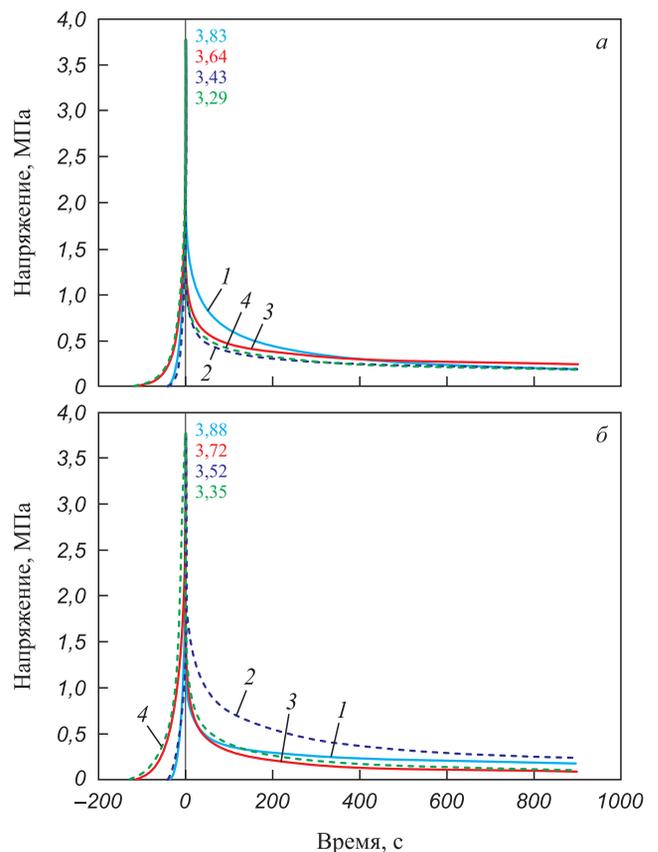


Рис. 4. Зависимости напряжений, сопровождающих стадии уплотнения до значения пористости 0 % и разгрузки от времени прессовок из материалов марок Т1 и ПС50/50 фракций 0,63 мм (а) и 2,5 мм (б):

1 – Т1, скорость 1,5 мм/с; 2 – ПС50/50, скорость 1,5 мм/с; 3 – Т1, скорость 0,5 мм/с; 4 – ПС50/50, скорость 0,5 мм/с

Fig. 4. Dependences of the stresses accompanying the stages of compaction to a porosity of 0 % and unloading of compacts from materials of grades T1 and PS50/50 with a fraction of: 0.63 mm (a) and 2.5 mm (b) on time:

1 – T1, rate 1.5 mm/s; 2 – PS50/50, rate 1.5 mm/s; 3 – T1, rate 0.5 mm/s; 4 – PS50/50, rate 0.5 mm/s

пористости 0 % и разгрузки от времени прессовок из материалов марок Т1 и ПС50/50 фракции 0,63 мм (а) и фракции 2,5 мм (б). На рис. 5 представлены зависимости напряжений, построенные аналогично зависимостям, представленным на рис. 4, но характерные для процессов формирования прессовок с пористостью $\Pi = 10\%$.

Представленные на рис. 4, 5 участки зависимостей, лежащие в зоне отрицательных значений времени, характеризуют процессы уплотнения воскообразных порошковых тел. Цифрами на графическом поле показаны пиковые значения напряжений, возникающих при уплотнении порошковых тел.

Из рис. 4 видно, что при увеличении скорости перемещения пресс-пуансона происходит увеличение значений напряжений, требующихся для формирования прессовок. При этом уплотнение порошка материала марки Т1 характеризуется несколько большими значе-

ниями напряжений, чем при уплотнении порошка парафино-стеаринового материала ПС50/50, обладающего большей пластичностью. На значение напряжений, возникающих при уплотнении порошкового тела, фракция модельного материала (при скоростях перемещения пресс-пуансона, применяемых в рамках настоящего эксперимента) существенное влияние оказывает преимущественно для условий прессования тел с малыми значениями пористости. Таким образом, наибольшие значения напряжений, возникающих при уплотнении рассматриваемых в эксперименте порошковых тел, определяются условиями, при которых порошковое тело состоит из наиболее крупной фракции, уплотнение происходит с большими значениями скорости перемещения пресс-пуансона, а требуемое значение конечной пористости минимальное.

Очевидно, что при более высокой скорости перемещения пресс-пуансона время деформирования сокращается. Однако снижение значений остаточных напряжений не находится в прямой зависимости от скорости перемещения пресс-пуансона при уплотнении экспериментальных порошковых тел.

В результате совместного анализа данных, представленных на рис. 4 и 5, можно заключить, что с увеличением пористости до 10 % происходит снижение необходимых для уплотнения прессовок напряжений. При этом изменение представленных на рис. 5 значений напряжений в зависимости от материала, скорости перемещения пресс-пуансона и фракции порошка происходит аналогично зависимостям, представленным на рис. 4. Также видно, что релаксация остаточных напряжений более чем на 90 % характерна для всех вариантов уплотнения уже по истечении 10 мин выдержки в стесненном состоянии. В целом следует отметить, что значения остаточных напряжений по завершении 15 мин выдержки прессовки в нагруженном состоянии не превышают 0,25 МПа для прессовок с $\Pi = 0\%$ и 0,12 МПа для прессовок с конечной пористостью $\Pi = 10\%$.

Согласно полученным ранее результатам экспериментальных исследований [33], направленных на определение значений напряжений, возникающих в ходе разрушения экспериментальных образцов, от значений их пористости установлено, что напряжения при разрушении прессовок тем больше, чем меньше их пористость и чем больше фракция материала, из которого получены прессовки. При этом вопросы влияния скорости уплотнения при получении прессовок и фракции материала на значение сопротивления сжатию и характер разрушения образцов не рассматривались.

В ходе эксперимента, связанного с определением пределов прочности на сжатие необходимо было установить зависимость этого параметра от пористости образцов, полученных деформированием порошковых тел, составленных из фракций воскообразных материалов Т1 и ПС50/50 при различных скоростях пере-

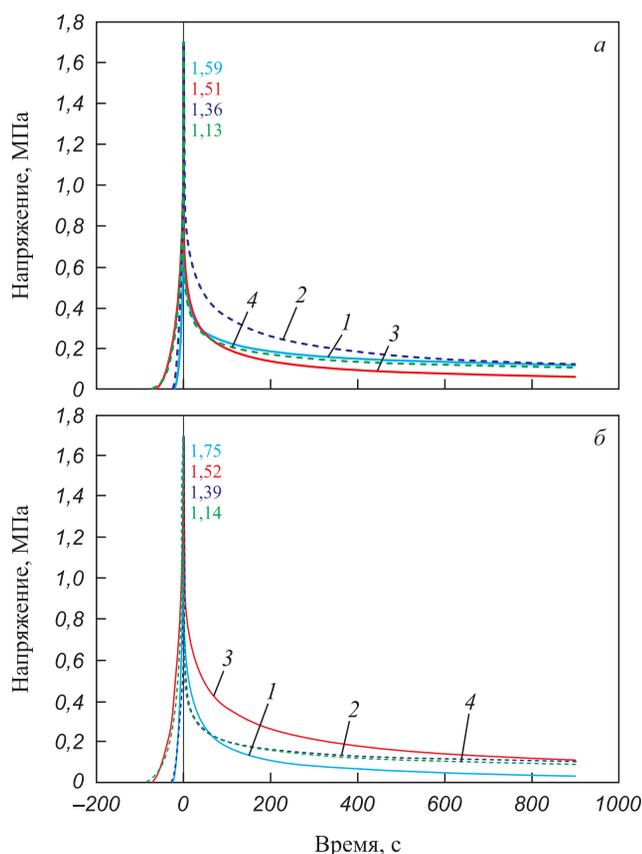


Рис. 5. Зависимости напряжений, сопровождающих стадии уплотнения до значения пористости 10 % и разгрузки от времени прессовок, формируемых из материалов марок Т1 и ПС50/50 фракций 0,63 мм (а) и 2,5 мм (б):

1 – Т1, скорость 1,5 мм/с; 2 – ПС50/50, скорость 1,5 мм/с;
3 – Т1, скорость 0,5 мм/с; 4 – ПС50/50, скорость 0,5 мм/с

Fig. 5. Dependences of the stresses accompanying the stages of compaction to a porosity of 10 % and unloading of compacts from materials of grades Т1 and PS50/50 with a fraction of 0.63 mm (а) and 2.5 mm (б) on time:

1 – Т1, rate 1.5 mm/s; 2 – PS50/50, rate 1.5 mm/s;
3 – Т1, rate 0.5 mm/s; 4 – PS50/50, rate 0.5 mm/s

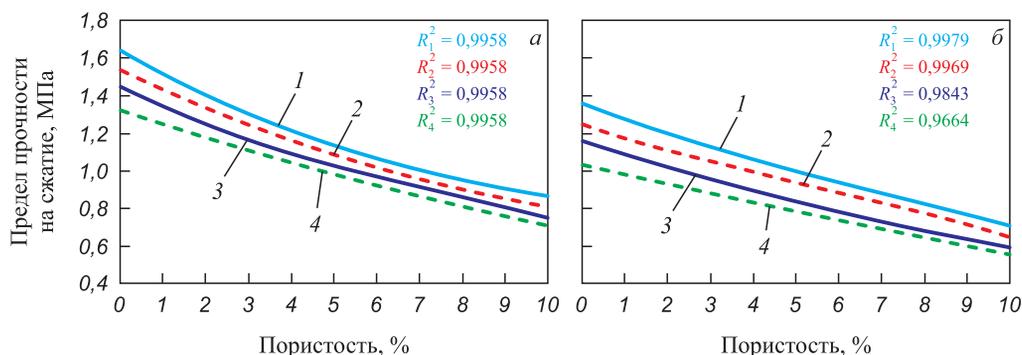


Рис. 6. Зависимости предела прочности на сжатие от пористости образцов, сформированных из фракций материалов марок Т1 (а) и ПС50/50 (б) при различных скоростях перемещения пресс-пуансона:

1 – фракция 2,5 мм, скорость 1,5 мм/с; 2 – фракция 0,63 мм, скорость 1,5 мм/с;
3 – фракция 2,5 мм, скорость 0,5 мм/с; 4 – фракция 0,63 мм, скорость 0,5 мм/с

Fig. 6. Dependences of ultimate compression strength on porosity of the samples from fractions of materials of grades T1 (a) and PS50/50 (б) at different rate of press punch movement:

1 – fraction 2.5 mm, rate 1.5 mm/s; 2 – fraction 0.63 mm, rate 1.5 mm/s;
3 – fraction 2.5 mm, rate 0.5 mm/s; 4 – fraction 0.63 mm, rate 0.5 mm/s

мещения пресс-пуансона в неподвижной матрице. На рис. 6 представлены полиномиальные зависимости третьего порядка определяемого параметра от пористости образцов, сформированных при различных скоростях перемещения пресс-пуансона. Символами R_i^2 помечены значения величины достоверности аппроксимации полиномиальных зависимостей пределов прочности образцов на сжатие.

Анализ данных, представленных на рис. 6, позволяет установить, что напряжения, возникающие при разрушении экспериментальных образцов сжатием пребывают в зависимости от максимальных значений напряжений, необходимых для уплотнения прессовок. Таким образом, чем выше скорость перемещения пресс-пуансона и крупнее фракция материала (при одинаковых заранее заданных значениях конечной пористости прессовки), тем выше значение напряжения при прессовании и, как следствие, выше значение предела прочности при разрушении образца.

В ходе эксперимента также проведена визуальная оценка характера разрушения экспериментальных прессовок и определено влияние таких факторов, как скорость прессования, фракция используемых в эксперименте материалов и конечная пористость прессовки. Стоит отметить, что в ходе визуального наблюдения деформирования прессовок при сжатии отмечается незначительное влияние фракции материалов и скорости перемещения пресс-пуансона при их формировании на картину процесса разрушения. На рис. 7 представлены наиболее характерные варианты разрушений образцов прессовок с минимальным и максимальным значениями пористости, получаемых из материала ПС50/50.

Из рис. 7 видно, что при сжатии образца с пористостью 0 % характерна бочкообразная форма деформации с более вязким типом разрушения. Образцы с пористостью 10 % разрушаются, принимая характерный для

них вид трапеции. В последнем случае образование трещин происходит при углах их наклона к горизонтальному основанию около 60° , что свидетельствует о более хрупком варианте разрушения.

В целом можно утверждать, что, хотя прессовки, сформированные из материала Т1, сопротивляются сжатию лучше, чем прессовки, сформированные из ПС50/50, последние имеют достаточную технологическую прочность для сопротивления сжимающим нагрузкам, возникающим в ходе нанесения первых (незатвердевших) слоев огнеупорной оболочки. Полученные в ходе эксперимента данные о характере разрушения экспериментальных прессовок направлены на реализацию возможности определения конструкции, массы и габаритов выплавляемых моделей и/или их элементов, выполняемых методами формовки порошковых модельных материалов.

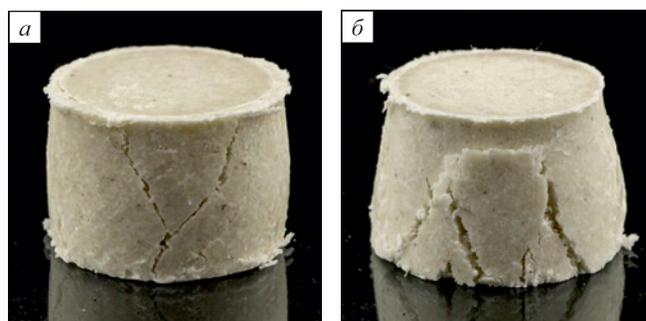


Рис. 7. Характер разрушения образцов прессовок, сформированных при скорости перемещения пресс-пуансона 0,5 мм/с:

а – ПС50/50, $\Pi = 0\%$, фракция 0,63 мм;
б – ПС50/50, $\Pi = 10\%$, фракция 0,63 мм

Fig.7. Nature of destruction of compacts formed at a rate of press punch movement of 0.5 mm/sec:
а – PS50/50, $P = 0\%$, fraction 0.63;
б – PS50/50, $P = 10\%$, fraction 0.63

Выводы

В результате серии экспериментов, состоящих из процессов нагружения воскообразных порошковых материалов, выдержки сформированных прессовок в стесненном состоянии, а также их разрушения определено влияние скорости перемещения пресс-пуансона на напряженно-деформированное состояние прессовок, формируемых в закрытой матрице.

Экспериментальным определением зависимостей напряжений, сопровождающих стадии уплотнения и разгрузки прессовок с пористостью 0 – 10 % от времени, при различных скоростях перемещения пресс-пуансона и фракций порошковых воскообразных материалов установлено:

– снижение задаваемых значений конечной пористости прессовок обеспечивает рост напряжений, возникающих при уплотнении воскообразных порошковых тел, а также определяется использованием более крупных фракций материалов, уплотнением при больших значениях скорости их прессования;

– на величину остаточных напряжений прессовок, пребывающих в стесненном состоянии после уплотнения, фактор скорости перемещения пресс-пуансона играет менее значимую роль, чем конечная пористость прессовок, в связи с чем при уплотнении экспериментальных порошковых тел значения остаточных напряжений по завершении 15 мин выдержки прессовки в нагруженном состоянии не превышают 0,25 МПа для прессовок с $\Pi = 0\%$ и 0,12 МПа для прессовок с конечной пористостью $\Pi = 10\%$.

В ходе анализа экспериментальных данных установлено, что рост скорости перемещения пресс-пуансона и увеличение фракции материала, подвергающегося прессованию, определяют рост значений напряжений, возникающих при разрушении экспериментальных образцов сжатием. Итоговая пористость прессовок и природа уплотняемого материала в большей степени влияют на вязкий или хрупкий характер разрушения прессовок, чем фракция материалов и скорость их прессования.

Результаты исследований направлены на реализацию возможности определения конструкции, массы и габаритов выплавляемых моделей и/или их элементов, выполняемых методами формовки порошковых модельных материалов, что, в конечном итоге, позволит повысить размерную и геометрическую точность отливок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Wang B., Zhang Z., Xu G., Zeng X., Hu W., Matsubae K. Wrought and cast aluminum flows in China in the context of electric vehicle diffusion and automotive lightweighting. *Resources, Conservation and Recycling*. 2023;191:106877. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.106877>
2. Lim S.S., Mun J.C., Kim T.W., Kang C.G. Development of low-temperature high-strength integral steel castings for off-shore construction by casting process engineering. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2014;6(4):922–934. <https://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0222>
3. Yang X., Zhang C., Li X., Cao Z., Wang P., Wang H., Liu G., Xia Z., Zhu D., Chen W.Q. Multinational dynamic steel cycle analysis reveals sequential decoupling between material use and economic growth. *Ecological Economics*. 2024;217:108092. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2023.108092>
4. Sata A., Ravi B. Bayesian inference-based investment-casting defect analysis system for industrial application. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017;90(9–12):3301–3315. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9614-0>
5. 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;24:48–55. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.11.054>
6. Гаранин В.Ф., Иванов В.Н., Казеннов С.А. и др. Литье по выплавляемым моделям. Под общ. ред. В.А. Озерова. 4-е издание, переработанное и дополненное. Москва: Машиностроение; 1994:448.
7. Dong R.Z., Wang W.H., Zhang T.R., Jiang R.S., Yang Z.N., Cui K., Wan Y.B. Ensemble learning-enabled early prediction of dimensional accuracy for complex products during investment casting. *Journal of Manufacturing Processes*. 2024;113:291–306. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.01.072>
8. Pattnaik S., Karunakar D.B., Jha P.K. Developments in investment casting process – A review. *Journal of Materials Processing Technology*. 2012;212(11):2332–2348. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.06.003>
9. Kapranos P., Carney C., Pola A., Jolly M. Advanced casting methodologies: investment casting, centrifugal casting, squeeze casting, metal spinning, and batch casting. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. Comprehensive Materials Processing*. 2014;5:39–67. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00539-2>
10. Yarlagadda P.K.D.V., Hock T.S. Statistical analysis on accuracy of wax patterns used in investment casting process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003;138(1–3):75–81. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00052-9](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00052-9)
11. 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;709(3):033104. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/3/033104>
12. Vidyarthi G., Gupta N. New development in investment casting process. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2017;8(12):529–540.
13. Huang P.H., Shih L.K.L., Lin H.M., Chu C.I., Chou C.S. Novel approach to investment casting of heat-resistant steel turbine blades for aircraft engines. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019;104:2911–2923. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04178-z>
14. Chen T.Y., Wang Y.C., Huang C.F., Liu Y.C., Lee S.C., Chan C.W., Fuh Y.K. Formation mechanism and improved remedy of thermal property of cold shut surface defects in

- Vortex Flow Meters: Numerical simulation and experimental verification in investment casting of 316 L stainless steel. *Journal of Manufacturing Processes*. 2024;120:542–554. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.04.052>
15. Chica E., Agudelo S., Sierra N. Lost wax casting process of the runner of a propeller turbine for small hydroelectric power plants. *Renewable Energy*. 2013;60:739–745. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.06.030>
 16. Thakre P., Chauhan A.S., Satyanarayana A., Kumar E.R., Pradyumna R. Estimation of shrinkage & distortion in Wax-Injection using Moldex3D simulation. *Materials Today: Proceedings*. 2018;5(9–3):19410–19417. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.301>
 17. 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 Чувашиского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния*. 2018;(4(38)):54–64. <https://doi.org/10.37972/chgpu.2020.11.35.024>
Zhilin S.G., Bogdanova N.A., Komarov O.N. Influence of granulometric composition and extrusion ratio of the waxy materials on the geometry of extended compact by extruding forming. *Bulletin of the Yakovlev Chuvash State Pedagogical University. Series: Mechanics of Limit State*. 2018;(4(38)):54–64. <https://doi.org/10.37972/chgpu.2020.11.35.024>
 18. Tacioglu S., Akar N. Conversion of an investment casting sprue wax to a pattern wax by chemical agents. *Materials and Manufacturing Processes*. 2003;18(5):753–768. <https://doi.org/10.1081/AMP-120024973>
 19. 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;34:4081–4110. <https://doi.org/10.1007/s00521-021-06747-4>
 20. Xu M., Lekakh S.N., Richards V.L. Thermal property database for investment casting shells. *International Journal of Metalcasting*. 2016;10:329–337. <https://doi.org/10.1007/s40962-016-0052-4>
 21. Perry M.C. Investment casting. *Advanced Materials & Processes*. 2008;166(6):31–33.
 22. 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;12: 264–269. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.09.046>
 23. 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):34–39.
Dubrovin V.K., Zaslavskaya O.M., Karpinskii A.V. Casting production from non-ferrous alloys in bulk molds of consumable patterns. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*. 2011;(2):34–39. (In Russ.).
 24. Harun Z., Kamarudin N.H., Badarulzaman N. A., Wahab M.S. Shell mould composite with rice husk. *Key Engineering Materials*. 2011;471-472:922–927. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.471-472.922>
 25. Aguilar J., Schievenbusch A., Kätzlitz O. Investment casting technology for production of TiAl low pressure turbine blades – Process engineering and parameter analysis. *Intermetallics*. 2011;19(6):757–761. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2010.11.014>
 26. 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;2176(1):030017. <https://doi.org/10.1063/1.5135141>
 27. Богданова Н.А., Жилин С.Г., Комаров О.Н. Способ получения биметаллической отливки. Патент на изобретение RU 2696118, опубл. 31.07.2019. Бюллетень № 22.
 28. Zhilin S.G., Komarov O.N., Bogdanova N.A., Amosov O.S. Mathematical modelling of forming processes in the conditions of uniaxial compaction of powder wax-like materials. In: *CEUR Workshop Proceedings. 6 ITHPC 2021 – Short Paper Proceedings of the 6th Int. Conf. on Information Technologies and High-Performance Computing*. 2021:148–154.
 29. Винокуров Г.Г., Попов О.Н. Статистическое моделирование корреляции локальной плотности макроструктуры при одностороннем прессовании порошковых материалов. *Известия Самарского научного центра РАН*. 2011;13(1–3):553–557.
Vinokurov G.G., Popov O.N. Statistical modeling of the correlation of local macrostructure density during one-sided pressing of powder materials. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2011;13(1–3):553–557. (In Russ.).
 30. Zhilin S.G., Bogdanova N.A., Komarov O.N., Sosnin A.A. Decrease in the elastic response in compacting a paraffin–stearin powder composition. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2021;2021(4):459–463. [10.1134/S0036029521040376](https://doi.org/10.1134/S0036029521040376)
 31. Krairi A., Matouš K., Salvadori A. A poro-viscoplastic constitutive model for cold compacted powders at finite strains. *International Journal of Solids and Structures*. 2018;135: 289–300. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2017.11.027>
 32. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология. Концепции, методы, приложения. Москва: Профессия; 2007:560.
 33. Жилин С.Г., Богданова Н.А., Комаров О.Н. Исследование процессов формирования пористых выплавляемых моделей, применяемых для изготовления высокоточного литья. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2023;29(3):54–66. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-3-54-66>
Zhilin S.G., Bogdanova N.A., Komarov O.N. Porous wax patterns for high-precision investment casting. *Izvestiya Non-Ferrous Metallurgy*. 2023;29(3):54–66. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-3-54-66>
 34. Жилин С.Г., Богданова Н.А., Комаров О.Н. Экспериментальное моделирование процессов формирования объемных прессовок из сферических воскообразных элементов. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2022;65(11):758–768. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-11-758-768>
Zhilin S.G., Bogdanova N.A., Komarov O.N. Experimental simulation of volumetric compacts formation from spherical waxy elements. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022;65(11):758–768. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-11-758-768>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Нина Анатольевна Богданова, младший научный сотрудник лаборатории проблем создания и обработки материалов и изделий, Институт машиноведения и металлургии Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения РАН

ORCID: 0000-0002-8769-8194

E-mail: joyful289@inbox.ru

Сергей Геннадьевич Жилин, к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории проблем создания и обработки материалов и изделий, Институт машиноведения и металлургии Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения РАН

ORCID: 0000-0002-0865-7109

E-mail: zhilin@imim.ru

Nina A. Bogdanova, Junior Researcher of the Laboratory of Problems of Creation and Processing of Materials and Products, Institute of Metallurgy and Mechanical Engineering of the Khabarovsk Federal Research Center, Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0002-8769-8194

E-mail: joyful289@inbox.ru

Sergei G. Zhilin, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Leading Researcher of the Laboratory of Problems of Creation and Processing of Materials and Products, Institute of Metallurgy and Mechanical Engineering of the Khabarovsk Federal Research Center, Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0002-0865-7109

E-mail: zhilin@imim.ru

Поступила в редакцию 11.07.2024

После доработки 22.07.2024

Принята к публикации 28.08.2024

Received 11.07.2024

Revised 22.07.2024

Accepted 28.08.2024