

УДК 621.74.045 : 53.09

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-3-54-66>

Научная статья

Research article



## Исследование процессов формирования пористых выплавляемых моделей, применяемых для изготовления высокоточного литья

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

Институт машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук  
681005, Россия, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, 1

✉ Сергей Геннадьевич Жилин ([sergeyzhilin1@rambler.ru](mailto:sergeyzhilin1@rambler.ru))

**Аннотация:** Конкурентоспособность современных предприятий машино-, судо- и авиастроения во многом определяется материало- и энергоэффективностью технологий, направленных на получение конструкций и узлов деталей ответственного назначения. Применение литья по выплавляемым моделям (ЛВМ) обеспечивает получение заготовок повышенной размерной и геометрической точности, сложной пространственной конфигурации из широкой номенклатуры сплавов. К недостаткам ЛВМ следует отнести многостадийность процесса и высокую стоимость конечного продукта, что предполагает недопустимость брака, доля которого может достигать 30 %. Брак в ЛВМ преимущественно вызван теплофизическими явлениями, сопровождающими ряд технологических операций и обуславливающими наличие напряжений в структуре воскообразных и керамических материалов, что определяет деформационные процессы в выплавляемых моделях и оболочковых формах. Для устранения негативного влияния теплофизического фактора и снижения напряжений в структурах промежуточных изделий процесса, выплавляемые модели формируют прессованием порошков воскообразных модельных композиций. При этом нерешенным остается вопрос релаксации напряжений в прессовках, приводящих к упругому отклику уплотненного материала и, как следствие, изменению размеров получаемого изделия. Поиск вариантов наиболее рационального режима формирования прессовки привел к необходимости проведения серии экспериментов, в результате которых предполагается достижение релаксации напряжений  $\sigma$  в условиях постоянной деформации сжатия, описываемого уравнением Кольрауша. Полученные в ходе эксперимента результаты позволяют прогнозировать конечные размеры прессовок и сформировать математическую модель процесса, актуальную для широкой номенклатуры воскообразных модельных материалов, применяемых в ЛВМ.

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

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках государственного финансирования Хабаровского федерального исследовательского центра ДВО РАН. Исследования проведены с использованием ресурсов ЦКПН «Центр обработки и хранения научных данных ДВО РАН», финансируемого Российской Федерацией в лице Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по проекту № 075-15-2021-663.

**Для цитирования:** 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>

## Porous wax patterns for high-precision investment casting

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

Institute of Machinery and Metallurgy of Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences  
681005, Russia, Khabarovsk region, Komsomolsk-on-Amur, Metallurgists str., 1

✉ Sergey G. Zhilin ([sergeyzhilin1@rambler.ru](mailto:sergeyzhilin1@rambler.ru))

**Annotation:** Aerospace, manufacturing, and shipbuilding industries strive to enhance their competitiveness by optimizing material utilization and improving production processes. The investment casting process offers the capability to fabricate intricate and precise

components using a diverse range of alloys. However, this method is not without its drawbacks, including high manufacturing costs and a significant rate of defective castings, which can reach up to 30 %. These defects primarily arise from the stresses imposed on the wax patterns and ceramic molds, leading to their distortion. To address this issue, efforts have been made to reduce stress by employing compacted wax powders for the production of investment patterns. However, stress relaxation in the wax patterns remains a concern as it can result in elastic deformation of the compacted material and subsequent alterations in the final product dimensions. To mitigate this issue, a series of tests were conducted with the objective of studying stress relaxation under constant compression strain, as described by the Kohlrausch equation. The obtained results provide valuable insights that enable the prediction of the ultimate dimensions of patterns created using different grades of wax.

**Keywords:** testing, manufacturing process, investment casting, stress-strain state, compaction, porosity, elastic deformation.

**Acknowledgments:** This study has received financial support from the Khabarovsk Federal Research Center, Far East Branch, Russian Academy of Sciences. The authors acknowledge the utilization of the Research Data Processing and Storage Center, Far East Branch, Russian Academy of Science, which is funded by the Russian government through the Ministry of Science and Higher Education under Project No. 075-15-2021-663.

**For citation:** 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>

## Введение

Положительная динамика в развитии предприятий судо-, машино-, и авиастроительной отраслей сохраняется преимущественно благодаря рыночной конъюнктуре, а именно взаимной увязке таких факторов, как уровни спроса и предложения, определяющих характер и объем используемых технологий, направленных на сокращение производственных издержек при сохранении качества получаемого продукта. Большинство известных производителей судовых двигателей (например, Wärtsila, Caterpillar, Volvo Penta, MTU, Cummins и др.) предпочитают сокращать издержки за счет применения практики замкнутого цикла, предполагающего повторное вовлечение части ресурсов в производство [1], что во многом определяет конкурентоспособность предприятий в долгосрочной перспективе. Сложившаяся практика повышения организационно-технического уровня машино-, судо- и авиастроения с использованием прогрессивных технологий и инновационного дорогостоящего оборудования, как правило, приводит к резкому удорожанию производимого продукта [2]. Поэтому важнейшей задачей является сокращение издержек уже на начальных стадиях формирования продукта, а именно в ходе металлоемкого производства литых заготовок для деталей и узлов ответственного назначения из широкой номенклатуры сплавов. При проектировании элементов агрегатов различного назначения учитываются особенности эксплуатации в условиях знакопеременных температур и нагрузок, обуславливающих высокие требования к удельной

конструкционной прочности такого литья [3], высокой твердости композитов, получаемых литьем [4], материалам (например, некоторым титановым сплавам) и специальным методам литья (в частности, центробежным способом), в том числе позволяющим использовать литые металлоизделия для добычи углеводородов в морских акваториях [5], а также к размерно-геометрической точности литья.

Одним из наиболее востребованных и металлоемких видов литой продукции, например при проектировании и производстве судов различного назначения и водоизмещения, являются гребные винты, получаемые из широкой линейки эвтектических и околоэвтектических высокоэнтропийных сплавов, удовлетворяющих требованиям взаимовязки таких характеристик, как прочность и пластичность, в широком диапазоне температур эксплуатации [6]. Большой спектр эксплуатационных характеристик изделий такого типа определяет высокую актуальность исследований, проводимых отечественными и зарубежными специалистами, направленных на повышение качества литья, формирование набора уникальных прочностных характеристик и поиск перспективных методов восстановления поврежденных участков литых изделий [7–9].

С целью прогнозируемого получения отливок различной конфигурации с заданной размерной и геометрической точностью, сокращения дефектообразования и, следовательно, снижения издержек, связанных с возможной эксплуатацией таких изделий, исследователи и специалисты вы-

нуждены использовать методы численного моделирования. Так, например, при реализации литья в песчано-глинистые формы для минимизации негативного влияния такого дефекта отливок, как усадка, размеры которой определяются совокупностью значительного числа факторов теплофизической природы сплавов, широко применяют программные комплексы, основанные на численных методах (методы конечных элементов, разностей или объемов; методы векторных элементов или векторного градиента и т.д.) [10; 11].

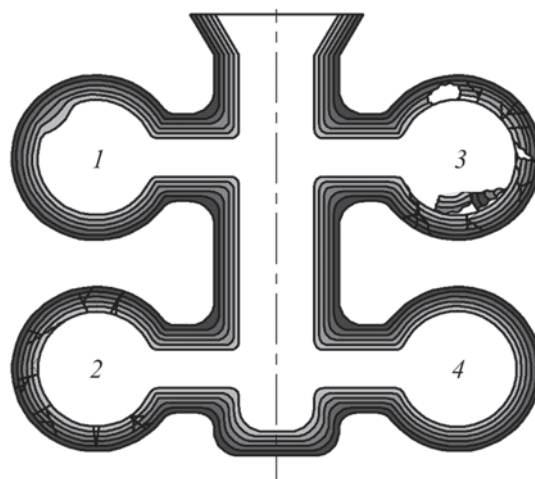
Безусловно, большинство известных численных методов прогнозирования параметров получаемого литого металлопродукта «страдают» рядом допущений и неточностей, определяющих необходимость натурной верификации данных, получаемых расчетами.

В отличие от традиционного литья в песчано-глинистые формы, используемого, например, в судостроении при отливке винтов, а также массивных и крупногабаритных элементов судов, количество программных продуктов для специальных способов получения литой продукции (центробежное литье, литье под давлением или литье по выплавляемым моделям) [12] существенно меньше. Значительное число факторов, влияющих на результаты технологических операций, затрудняют расчет и моделирование для процессов литья по выплавляемым моделям (ЛВМ).

Литье по выплавляемым моделям — многооперационный процесс, отличающийся значительной номенклатурой используемых материалов, позволяющий объединить отдельные детали в цельнолитые узлы, что обуславливает целесообразность его применения для получения литых заготовок со сложной пространственной конфигурацией и повышенными размерно-геометрическими характеристиками, в ряде случаев не требующих механической обработки [13]. По выплавляемым моделям получают отливки размерами до 500 мм с толщиной стенки до 1 мм и шероховатостью поверхности до  $R_a = 1,25$  мкм, соответствующие 11–16 квалитетам при допусках на размеры рабочей полости пресс-формы и не превышающие 8–9 квалитетов согласно ГОСТ 25347-82 «Основные нормы взаимозаменяемости. Единая система допусков и посадок. Поля допусков и рекомендуемые посадки».

Наиболее распространенной в процессах ЛВМ является последовательность следующих укрупненных блоков технологических операций: изготовление выплавляемых моделей из воскообраз-

ных материалов и их сборка в модельные блоки; послойное формирование на них керамической оболочковой формы; выплавление из оболочек модельного состава, их прокатка и заливка расплавом металла; механическая обработка. Изменение объемов выплавляемой модели по причине усадки или термического расширения материала достигает 10–14 %, что определяет необходимость учета теплофизических процессов, сопровождающих нагрев и охлаждение материала, при выборе величины «припуска» на механическую обработку литых заготовок [14; 15]. Очевидно, что теплофизические процессы, протекающие в материалах в ходе технологических операций, во многом способствуют формированию брака, совокупная доля которого в рассматриваемом виде литья может достигать 30 % [16; 17]. К числу негативных факторов, определяющих появление брака, следует отнести: изменение температуры воскообразных модельных материалов при их подаче в пресс-формы, определяющее нарушение геометрии поверхности выплавляемой модели в виде слоистости, усадки или коробления; проникновение воскообразного расплава в структуру керамической формы во время операции выплавления модельного материала, приводящее к разрушению оболочки на стадии ее прокатки или заливки расплавом металла. На рис. 1 представлена схема последовательности появления типичных дефектов, характерных для различных стадий ЛВМ: 1 — усадка воскообразного мо-



**Рис. 1.** Схема последовательности появления типичных дефектов, характерных для различных этапов получения отливок методом ЛВМ, на примере 5-слойной керамической оболочковой формы

**Fig. 1.** Investment casting defect formation flowchart for a 5-layer ceramic shell mold

дельного материала, следствием которой является нарушение геометрии выплавляемой модели и, следовательно, отливки; 2 — появление трещин в слоях керамической оболочковой формы в результате температурного расширения воскообразного материала на этапе его выплавления из керамики; 3 — расширение модельного материала в порах керамической оболочки на этапе ее прокаливания, приводящее к механическому засору отливки фрагментами керамики; 4 — бездефектная полость керамической оболочки.

Традиционно применяемые методы борьбы с усадочными явлениями при остывании модельных материалов, наряду с исправлением последствий таких дефектов, решаются подбором материалов с необходимым набором реологических характеристик или их модифицированием, а также формированием выплавляемых моделей в узком температурном интервале [18; 19].

В связи с вышеотмеченным становится очевидным, что значительное количество технологических переделов и высокая стоимость расходных материалов определяют недопустимость брака в таком производстве и актуальность поиска альтернативных вариантов получения литья.

Поиск новых или модернизация традиционных модельных материалов воскообразной группы приводит к появлению дополнительных расходов. В качестве основы значительной части воскообразных модельных материалов используют нефтяные парафины, которые сочетают с различными добавками: стеарином, церезином, канифолью, бурогольным воском и т.д.; одним из наиболее распространенных модельных материалов является ПС50/50, представляющий собой сплав равных долей (по массе) парафина и стеарина и относящийся к первой классификационной группе [13].

Поскольку при затвердевании воскообразного сплава ПС50/50 в выплавляемой модели формируется напряженная структура с наличием трещин и сколов, то повышение размерно-геометрической точности традиционной модели представляется затруднительным. Технологически предпочтительным представляется вариант формирования выплавляемых моделей из порошков воскообразных материалов, что позволит снизить напряженно-деформированное состояние модели и в конечном итоге обеспечить большую точность за счет проникновения материала в сложные участки формообразующей полости пресс-формы и обеспечения требуемой плотности прессовки [20; 21]. Разработка таких процессов осуществляется учеными из Хаба-

ровского федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения РАН.

В процессе холодного уплотнения порошка воскообразного материала под действием давления за счет межчастичного трения и трения о стенки пресс-формы [22] происходит рост температуры, оплавление участков контактирующих частиц материала и формируется пористая каркасная структура выплавляемой модели с конфигурацией наружной поверхности, соответствующей формообразующей полости пресс-формы. Применение такого подхода приводит к формированию выплавляемой модели без усадочных дефектов, которые не оказывают силового воздействия на внутренние стенки керамической оболочки при выплавлении модельного материала.

Среди недостатков представленного процесса стоит отметить вероятность изменения геометрии прессовки, обусловленного выходом находящегося под давлением воздуха и разгрузкой стесненного в ходе уплотнения материала. Экспериментально определено, что величина упругого отклика воскообразного материала после снятия нагрузки составляет 0,7–1,2 % в направлении оси прессования и 0,4–0,5 % в поперечном направлении [23]. Очевидно, что при получении выплавляемых моделей прессованием порошков воскообразных материалов их размеры искажаются в значительно меньшей степени, чем при их формировании из жидкого или пастообразного модельного материала [24; 25]. Несмотря на более приемлемые значения конечных размеров выплавляемой модели, полученной прессованием, полное устранение явления искажения размеров все же представляется актуальным, а недостаток информации о процессах управления величиной упругого отклика уплотняемых материалов обуславливает необходимость их экспериментального изучения.

На значение величины упругой разгрузки уплотненного материала оказывают влияние его реологические свойства: упругость, пластичность, прочность, вязкость, ползучесть. Поскольку при холодном прессовании в материале прессовки возникают локальные участки с повышенной температурой, то очевидно, что снижение величины упругого отклика пребывает в зависимости от времени релаксации материала, на которое, в свою очередь, влияют фракция материала, значения давления и скорости его уплотнения. Значения напряжений, зависящие от реологических свойств уплотняемого материала, растут пропорционально увеличению плотности прессовки. В этой связи интерес пред-

ставляет процесс релаксации напряжений, а именно определение для уплотненного материала при постоянной нагрузке времени, по достижении которого упругие деформации перейдут в необратимые (пластические) [26; 27]. Предварительными экспериментами установлено, что при использовании в ходе уплотнения интервала скоростей совмещения формообразующих элементов пресс-матрицы 0,25–1,5 мм/с величина упругого отклика материала прессовок из воскообразных порошков не превышает 1,2 % в направлении оси нагружения. Принудительная релаксация материала, заключающаяся в его выдержке в пресс-матрице в нагруженном состоянии, обеспечивает перераспределение напряжений в прессовке и позволяет снизить ее упругий отклик. Таким образом, получение выплавляемых моделей с прогнозируемой геометрией и минимальными искажениями размеров относительно формообразующей полости пресс-формы при прессовании порошков воскообразных модельных композиций представляется актуальной задачей.

Цель работы — сравнение результатов расчетного и экспериментального определения параметров процесса прессования порошков воскообразных модельных материалов, применимых для прогнозирования отклонения линейных размеров пористых выплавляемых моделей от размеров формообразующей полости пресс-формы.

В рамках поставленной цели решались следующие задачи:

— экспериментальное определение зависимостей напряжений, возникающих при уплотнении порошков воскообразных модельных материалов, от значений пористости получаемых прессовок;

— сопоставление значений напряжений, определяемых при оценке прочности уплотняемых порошковых тел, со значениями напряжений, возникающих при формировании экспериментальных прессовок;

— нахождение параметров уравнения релаксации напряжений для прессовок из порошков воскообразных модельных материалов.

## Методы и материалы

Для расчетного нахождения зависимости между действующими на прессовку напряжениями ( $\sigma$ ), вызываемыми деформациями ( $\epsilon$ ), и их изменениями во времени ( $\tau$ ) требуется применение реологического уравнения состояния материала:

$$f(\sigma, \epsilon, \tau) = 0. \quad (1)$$

Экспериментальное определение реологических свойств уплотняемого порошкового материала целесообразно при постоянных значениях деформации сжатия:  $\epsilon = \text{const}$  [28]. В результате уплотнения порошкового материала локальный рост температуры достигает температуры плавления. При разгрузке температура снижается. Релаксацию напряжения  $\sigma$  для области застывания воскообразного материала в условиях  $\epsilon = \text{const}$  можно описать уравнением Кольрауша [29; 30]:

$$\sigma = \sigma_0 \exp^{-(t/a)^b}, \quad (2)$$

где  $a$  и  $b$  ( $0 < b \leq 1$ ) — константы при заданных температуре и давлении,  $\sigma$  — напряжение в момент времени  $t$ ;  $\sigma_0$  — релаксирующая часть напряжения.

Расчет прогнозируемых параметров уравнения Кольрауша, характеризующих релаксационные свойства уплотненного воскообразного порошкового тела, необходимо произвести при помощи экспериментальных кривых по методике, описанной в работе [31]. В нашем случае, для пористого тела, такое аналитическое выражение для прогнозной кривой релаксации будет иметь вид

$$\sigma = \sigma_0(P) \exp^{-(t/\tau)^k}, \quad (3)$$

где  $\sigma_0(P)$  — пиковое значение напряжения на пресс-пуансоне в момент начала разгрузки при заданной пористости  $P$ .

Параметры  $\tau$  и  $k$  аналитического выражения кривой релаксации пористого тела определяем методом наименьших квадратов. Для этого обозначим через  $\tilde{\sigma}_i$  отнесенное к  $\sigma_0(P)$  экспериментальное значение напряжения в момент времени  $t_i$ :  $\tilde{\sigma}_i = \sigma(t_i)/\sigma_0(P)$ . Задача определения параметров выражения (3) сводится к минимизации обобщенного показателя рассеяния. Применяем метод наименьших квадратов не к исходной форме экспоненциальной функции (2), а к ее преобразованной форме (3). Поскольку значения  $\tilde{\sigma}_i$  лежат в промежутке  $0 < \tilde{\sigma}_i \leq 1$ , то  $\ln \tilde{\sigma}_i \leq 0$ , а значит, показатель рассеяния можно представить в виде

$$Q = \sum_{i=1}^n \left\{ \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) - \ln \left[ -\ln(\exp^{-(t_i/\tau)^k}) \right] \right\}^2 = \sum_{i=1}^n [\ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) - k \ln(t_i/\tau)]^2. \quad (4)$$

При выборе экспериментальных точек необходимо учитывать, что в момент начала разгрузки при  $\tilde{\sigma}_i = 1$  или в момент времени  $t = 0$  выраже-

ние (4) не существует, а  $\exp^{-(t/\tau)^k} \Big|_{t=0} = \tilde{\sigma}_i(t_0) = 1$ . Приравниваем нулю частные производные  $Q$  по  $\tau$  и  $k$ :

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial \tau} &= 2 \sum_{i=1}^n [\ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) - k \ln(t_i / \tau)] \frac{k}{\tau} = 0, \\ \frac{\partial Q}{\partial k} &= -2 \sum_{i=1}^n [\ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) - k \ln(t_i / \tau)] \ln(t_i / \tau) = 0. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Преобразовав систему (5), получим стандартную форму нормальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} k n \ln\left(\frac{1}{\tau}\right) + k \sum_{i=1}^n \ln t_i &= \sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i), \\ k \ln\left(\frac{1}{\tau}\right) \sum_{i=1}^n \ln t_i + k \sum_{i=1}^n (\ln t_i)^2 &= \sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) \ln t_i. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Решая систему (6), получаем

$$\begin{aligned} k \ln\left(\frac{1}{\tau}\right) &= \frac{\sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) \sum_{i=1}^n (\ln t_i)^2 - \sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) \ln t_i \sum_{i=1}^n \ln t_i}{n \sum_{i=1}^n (\ln t_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n \ln t_i\right)^2}, \\ k &= \frac{n \sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) \ln t_i - \sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) \sum_{i=1}^n \ln t_i}{n \sum_{i=1}^n (\ln t_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n \ln t_i\right)^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Выражая  $\tau$ , находим

$$\tau = \exp \left[ \frac{\sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) \ln t_i \sum_{i=1}^n \ln t_i - \sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) \sum_{i=1}^n (\ln t_i)^2}{n \sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) \ln t_i - \sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) \sum_{i=1}^n \ln t_i} \right]. \quad (8)$$

Таким образом, параметры  $k$  и  $\tau$  для уравнения Кольрауша (3) определяются по экспериментальным данным соотношениями (7) и (8).

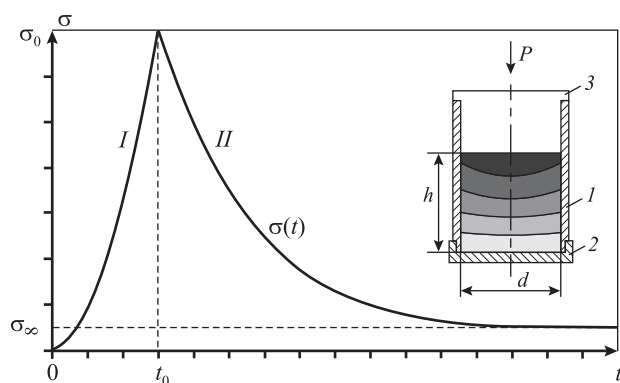
Из соображений практической целесообразности для экспериментального моделирования в качестве порошковых воскообразных модельных материалов использованы парафин очищенный марки Т1 и сплав парафина со стеарином ПС50/50 (в соотношении 1 к 1). Указанные материалы соответствуют первой классификационной группе согласно [13] и широко распространены в ЛВМ-процессах. Поскольку реальные характеристики воскообразных материалов могут иметь отличия от свойств, регламентированных соответствующими ГОСТами (например, ГОСТ 23683-89 «Парафины нефтяные твердые. Технические условия»), то для них экспериментально определены

значения плотности ( $\rho$ ) и модуля Юнга ( $E$ ): для Т1  $\rho = 0,86$  г/см<sup>3</sup>,  $E = 81,91$  МПа; для ПС50/50  $\rho = 0,935$  г/см<sup>3</sup>,  $E = 71,8$  МПа. Температуры плавления материалов Т1 и ПС50/50 установлены в ходе нагрева со скоростью 2 °С/мин при помощи дифференциально-термического анализатора «Shimadzu DTG-60H» и составили 58 и 52 °С соответственно для Т1 и ПС50/50. Поскольку используемые материалы характеризуются низкой температурой плавления, то достоверность эксперимента обеспечивали его проведением в узком температурном диапазоне окружающей среды  $20 \pm 2$  °С.

Реализация поставленных задач осуществлялась при помощи пресс-формы из стали 45, формирующая поверхность которой выполнена в виде полого цилиндра с внутренним диаметром  $d = 43,3$  мм. Пресс-форма принимается в эксперименте недеформируемой. После помещения в нее порошков материалов Т1 и ПС50/50 технологически предпочтительных фракций 0,63 и 2,5 мм она устанавливалась на рабочую поверхность тестовой машины. Для использованных в эксперименте материалов значения насыпной плотности ( $\rho_{\text{нас}}$ ) были следующие, г/см<sup>3</sup>: 0,360 (Т1, фракция 2,5 мм); 0,320 (Т1, фракция 0,63 мм); 0,340 (ПС50/50, фракция 2,5 мм); 0,310 (ПС50/50, фракция 0,63 мм). Поскольку фракции порошков получены рассевом на ситах модели 026 и имеют хлопьевидную форму, то известные методики расчета конечных свойств прессовок, формируемых из порошков со сферическими частицами, в нашем случае не могут обеспечить достоверность результатов [32].

Требуемую пористость прессовок ( $\Pi$ ), изменяемую в диапазоне значений  $0\% \leq \Pi \leq 12\%$  с шагом 2 %, достигали в результате различного уровня деформации ( $\epsilon$ ) порошков перемещением пресспуансона со скоростью 1 мм/с до момента, соответствующего равенству конечной высоты прессовки ее диаметру:  $h = d$  (см. рис. 2). С этого момента в течение времени релаксации 60 мин с  $t_0$  до  $t_{60}$  фиксировали напряжения, создающиеся на травесе тестовой машины, в качестве которой использован агрегат «AG-X plus Shimadzu», позволяющий обеспечить максимальное усилие при нагружении до 250 кН. Величина отклонения 0,03 % при нагрузке 100 кН и деформации 10 мм, регламентированная производителем «AG-X plus Shimadzu», обеспечивает достоверность экспериментальных данных.

Схема нагружения и релаксации порошков при формировании пористых прессовок из воскообразных материалов Т1 и ПС50/50 представлена



**Рис. 2.** Схема нагружения и релаксации порошкового тела из воскообразных материалов Т1 и ПС50/50

*I* – кривая нагружения, *II* – кривая релаксации  
*1* – пресс-матрица, *2* – основание, *3* – пресс-пуансон

**Fig. 2.** Loading and relaxation of T1 and PS50 wax powders

*I* – loading curve, *II* – relaxation curve  
*1* – mold, *2* – bottom, *3* – punch

на рис. 2. Пористость прессовки рассчитывали по формуле

$$P = (1 - \rho_p / \rho_l) \cdot 100 \%, \quad (9)$$

где  $\rho_p$  – плотность пористого образца, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_l$  – плотность литого материала, кг/м<sup>3</sup>.

Диапазон значений пористости обусловлен механическими характеристиками прессовок. Предварительно установлено, что прессовки, имеющие  $P > 12 \%$ , обладают неудовлетворительными значениями поверхностной твердости и низкой прочностью, что свидетельствует о нецелесообразности их использования. Массу ( $M$ , кг) навески порошка для формирования прессовки требуемой пористости  $P$  определяли исходя из условия

$$M = h \rho_l \left( 1 - \frac{P}{100} \right) \left( \frac{\pi d^2}{4} \right). \quad (10)$$

В нашем случае  $h = d = 0,0433$  м, и масса навески для каждого варианта конечной пористости прессовки из материалов Т1 и ПС50/50 определяется по экспериментальным уравнениям

$$M_{T1} = -0,55P + 55,$$

$$M_{PS50/50} = -0,5959P + 59,59.$$

По достижении положения  $h$  траверсу фиксировали на протяжении 60 мин и осуществляли регистрацию напряжений на ней тестовой машиной «AG-X plus Shimadzu». По мере удаления воздуха из прессовки и перераспределения плотности

в ее объеме напряжения снижаются, но не всегда устраняются полностью, что приводит к изменению размеров прессовки ввиду упругого возврата уплотненного материала, определяемого следующим образом:

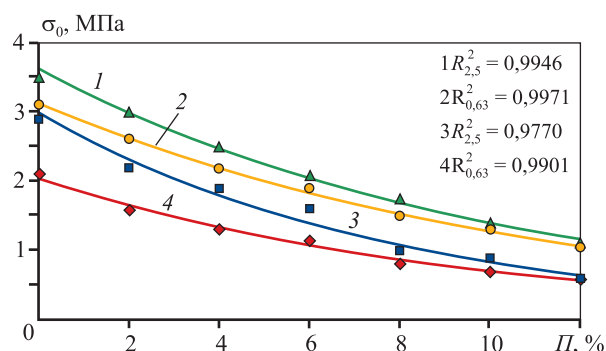
$$O = \frac{(d_i - d)}{d_i} \cdot 100 \%, \quad (11)$$

где  $O$  – значение упругого отклика материала, %;  $d$  и  $d_i$  – соответственно внутренний диаметр пресс-формы и высота  $i$ -й прессовки, измеряемые при помощи цифрового регистратора «DIN 863 Vogel» с точностью измерения 0,001 мм.

Прочность на сжатие уплотненных прессовок в виде цилиндрических образцов, также осуществляемое при помощи тестовой машины «AG-X plus Shimadzu» со скоростью перемещения траверсы 0,1 мм/с, определяли по завершении выдержки (при температуре  $20 \pm 2$  °C) в течение 48 ч.

## Обсуждение результатов

На рис. 3 представлены результаты реальных экспериментов в виде сравнения экспоненциальных зависимостей напряжений  $\sigma_0$ , возникающих при уплотнении порошковых тел из материалов марок Т1 и ПС50/50 фракций 2,5 и 0,63 мм, от задаваемой в эксперименте пористости прессовки. Также дополнительно приведены значения величины достоверности аппроксимации полиномиальных зависимостей  $1R_{2,5}^2$ ;  $2R_{0,63}^2$ ;  $3R_{2,5}^2$  и  $4R_{0,63}^2$ ,



**Рис. 3.** Сравнение зависимостей напряжений от пористости прессовок из порошков воскообразных материалов Т1 и ПС50/50 различных фракций

*1* – Т1, фракция 2,5 мм; *2* – Т1, фракция 0,63 мм;  
*3* – ПС50/50, фракция 2,5 мм; *4* – ПС50/50, фракция 0,63 мм

**Fig. 3.** Stress vs. porosity in the T1 and PS50/50 powder wax samples

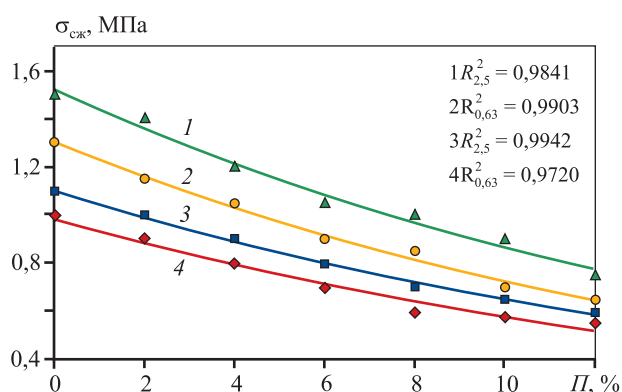
*1* – T1, 2.5 mm particle size; *2* – T1, 0.63 mm particle size;  
*3* – PS50/50, 2.5 mm particle size;  
*4* – PS50/50, 0.63 mm particle size

характерные для прессовок из материалов Т1 и ПС50/50 фракций 2,5 и 0,63 мм соответственно.

Из рис. 3 видно, что напряжения, возникающие на траверсе тестовой машины при уплотнении порошковых тел из более крупной фракции 2,5 мм, выше, чем при получении прессовок из фракции 0,63 мм, для всех материалов, использованных в эксперименте. Такие зависимости объяснимы превышением значений насыпной плотности фракций 2,5 мм над значениями плотности фракций 0,63 мм. Помимо насыпной плотности исходного порошкового материала, на значения напряжений при уплотнении оказывает влияние его пластичность, которая, в свою очередь, зависит от температуры плавления [33; 34]. Температура плавления материала Т1 выше температуры плавления ПС50/50, а следовательно, значения напряжений при уплотнении Т1 больше, чем при использовании материала ПС50/50. Экспериментом установлено, что при 4-кратном увеличении размеров фракций уплотняемых частиц материалов Т1 и ПС50/50 до состояния, когда  $0\% \leq \Pi \leq 2\%$ , разница в значениях напряжений при уплотнении прессовок достигает 30 %. Очевидно, что с ростом  $\Pi$  различие в значениях амплитуд напряжений для прессовок из разных фракций материалов сокращается.

Практический интерес представляет сравнение напряжений, сопровождающих формирование прессовок различных фракций, с напряжениями, возникающими в ходе разрушения экспериментальных образцов с теми же значениями пористости в результате сжатия. На рис. 4 представлены зависимости пределов прочности экспериментальных цилиндрических образцов на сжатие ( $\sigma_{сж}$ ) от их пористости. Их анализ показывает, что напряжения, возникающие при разрушении прессовок сжатием при различной их пористости, задаваемой в эксперименте, тем больше, чем крупнее фракция материала, из которого получены прессовки. В целом можно утверждать, что, хотя прессовки, сформированные из материала Т1, сопротивляются сжатию лучше, чем прессовки из ПС50/50, последние имеют достаточную технологическую прочность для сопротивления сжимающим нагрузкам, возникающим в ходе нанесения первых (незатвердевших) слоев огнеупорной оболочки.

В связи с отмеченным выше, для условий реального производства задача прогнозирования технологической прочности выплавляемых моделей на промежуточных стадиях ЛВМ-процесса имеет высокую актуальность. Поскольку на стадии на-



**Рис. 4.** Сравнение зависимостей предела прочности на сжатие от пористости прессовок из порошков воскообразных материалов Т1 и ПС50/50 различных фракций

1 – Т1, фракция 2,5 мм; 2 – Т1, фракция 0,63 мм;  
3 – ПС50/50, фракция 2,5 мм;  
4 – ПС50/50, фракция 0,63 мм

**Fig. 4.** Ultimate compressive strength vs. porosity in the T1 and PS50/50 powder wax samples

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

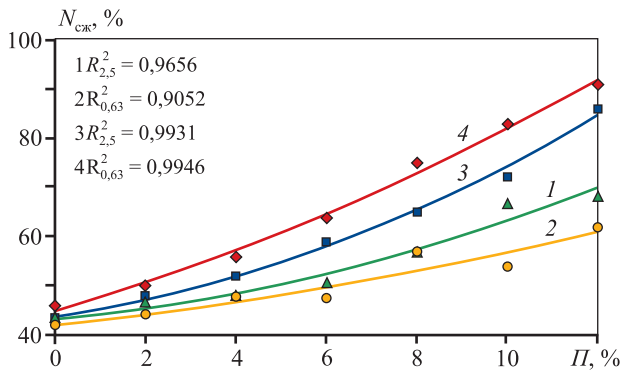
несения керамических слоев выплавляемые модели, расположенные на модельных блоках, преимущественно испытывают нагрузку, связанную с их сжатием, то для предварительной оценки прочности на сжатие выплавляемых моделей, получаемых прессованием, уже на стадии их формирования целесообразно введение показателя пропорциональности напряжений  $N_{сж}$ . Этот показатель означает, на сколько значение предела прочности прессовки при сжатии меньше напряжений, возникающих при изготовлении выплавляемой модели прессованием порошка модельного материала. Расчет показателя пропорциональности напряжений предлагается осуществлять по формуле

$$N_{сж} = (\sigma_{сж} \cdot 100\%) / \sigma_0, \quad (12)$$

где  $\sigma_{сж}$  — предел прочности при сжатии, МПа;  $\sigma_0$  — напряжения, возникающие на траверсе тестовой машины при формировании прессовки, МПа.

На рис. 5 приведены зависимости показателя пропорциональности напряжений ( $N_{сж}$ ) от значений пористости прессовок в интервале  $0 \leq \Pi \leq 12\%$ , формируемых из материалов Т1 и ПС50/50 фракций 0,63 мм и 2,5 мм.

Таким образом, данные рис. 5 позволяют практически прогнозировать значение прочности на сжатие будущей прессовки с помощью показателя пропорциональности напряжений. Из рис. 5 вид-



**Рис. 5.** Сравнение зависимостей показателя пропорциональности напряжений от пористости прессовок из порошков воскообразных материалов Т1 и PC50/50 различных фракций  
1 – Т1, фракция 2,5 мм; 2 – Т1, фракция 0,63 мм;  
3 – PC50/50, фракция 2,5 мм;  
4 – PC50/50, фракция 0,63 мм

**Fig. 5.** Stress safety margin vs. porosity of T1 and PS50/50 powder wax samples  
1 – T1, 2.5 mm particle size; 2 – T1, 0.63 mm particle size;  
3 – PS50/50, 2.5 mm particle size;  
4 – PS50/50, 0.63 mm particle size

но, что значение предела прочности  $\sigma_{сж}$ , характерного, например, для прессовки из фракции 0,63 мм материала Т1, имеющей пористость  $\Pi = 8 \%$ , будет составлять 57 % от значения напряжений  $\sigma_0$ , возникающих при формировании прессовки.

В ходе определения значений напряжений  $\sigma_i$ , возникающих на траверсе тестовой машины при релаксации прессовок в нагруженном состоянии, установлено, что существенное изменение значений  $\sigma_i$  для прессовок из всех фракций задействованных в эксперименте материалов не превышает 25 мин. Очевидно, что чем выше пористость, тем

снижение значений напряжений  $\sigma_i$  для прессовок, полученных из более крупной фракции материала 2,5 мм, требует больших временных затрат по сравнению с прессовками, полученными из фракции 0,63 мм. В целом релаксация прессовок из материала марки PC50/50 требует меньшего времени, чем разгрузка напряжений в прессовках из материала марки Т1. В таблице приведены значения расчетных параметров  $k$  и  $\tau$  для уравнения Кольрауша, определенные по экспериментальным данным согласно выражениям (7) и (8) для прессовок с пористостью 0 и 12 %. Видно, что для всех материалов с большей пористостью показатели  $k$  и  $\tau$  ниже. В результате подстановки значений  $k$  и  $\tau$  в аналитическое выражение (3) получаем прогнозные кривые релаксации уплотненного материала.

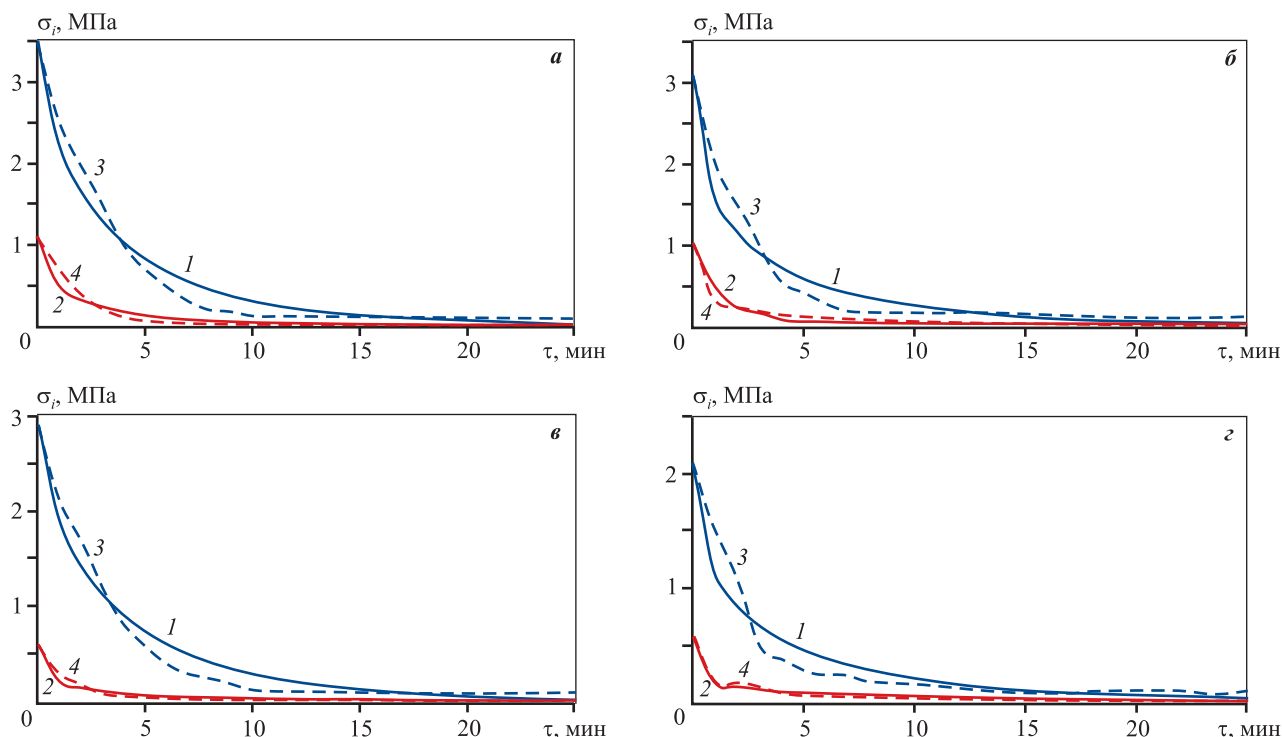
На рис. 6 представлены результаты расчетного и экспериментального определения времени релаксации прессовок из материалов Т1 (рис. 6, а и б) и PC50/50 (рис. 6, в и г) фракций 2,5 и 0,63 мм соответственно.

Из анализа данных рис. 6 следует, что экспериментальные напряжения  $\sigma_i$ , возникающие при разгрузке уплотненного материала, убывают несколько быстрее, чем по экспоненциальному закону. Установлено, что существенные (более чем на 90 %) изменения экспериментальных значений  $\sigma_i$  завершаются к 5-й и 10-й минутам выдержки под нагрузкой прессовок, характеризующихся значениями пористости  $\Pi = 12$  и 0 % соответственно. Это утверждение справедливо для всех марок и фракций используемых в эксперименте материалов. В целом динамику падения значений расчетных и экспериментальных напряжений  $\sigma_i$  следует считать совпадающей, удовлетворяющей требованиям задач настоящего исследования.

**Расчетные параметры  $k$  и  $\tau$  для уравнения Кольрауша, определенные по экспериментальным данным**

Experimental  $k$  and  $\tau$  values for the Kohlrausch equation

| Марка материала | Фракция материала, мм | Пористость прессовки, % | Параметры аналитического выражения |        |
|-----------------|-----------------------|-------------------------|------------------------------------|--------|
|                 |                       |                         | $k$                                | $\tau$ |
| Т1              | 2,5                   | 0                       | 0,729                              | 3,034  |
|                 | 2,5                   | 12                      | 0,589                              | 1,478  |
|                 | 0,63                  | 0                       | 0,568                              | 2,058  |
|                 | 0,63                  | 12                      | 0,375                              | 0,706  |
| PC50/50         | 2,5                   | 0                       | 0,722                              | 3,250  |
|                 | 2,5                   | 12                      | 0,401                              | 1,023  |
|                 | 0,63                  | 0                       | 0,566                              | 2,453  |
|                 | 0,63                  | 12                      | 0,313                              | 0,742  |



**Рис. 6.** Сравнение экспериментальных и расчетных экспоненциальных зависимостей напряжений от времени релаксации прессовок для различных материалов и фракций

*a* – T1, фракция 2,5 мм; *б* – T1, фракция 0,63 мм; *в* – ПС50/50, фракция 2,5 мм; *г* – ПС50/50, фракция 0,63 мм  
1, 3 –  $P = 0\%$ ; 2, 4 –  $P = 12\%$

Сплошные кривые – расчет, штриховые – эксперимент

**Fig. 6.** Experimental and estimated stress vs. relaxation period curves for different wax grades and particle sizes

*a* – T1, 2.5 mm particle size; *б* – T1, 0.63 mm particle size; *в* – PS50/50, 2.5 mm particle size; *г* – PS50/50, 0.63 mm particle size  
1, 3 –  $P = 0\%$ ; 2, 4 –  $P = 12\%$

Solid curves – estimated, dashed curves – experimental

## Закключение

Установлено, что напряжения, возникающие на траверсе тестовой машины при уплотнении порошковых тел из более крупной фракции 2,5 мм, выше, чем при получении прессовок из фракции 0,63 мм, для всех материалов, использованных в эксперименте, что объясняется большей насыпной плотностью фракции 2,5 мм по сравнению с фракцией 0,63 мм, а также различиями в пластических свойствах материала, определяемыми в том числе температурой их плавления.

Определено, что напряжения, возникающие при разрушении прессовок сжатием, зависят от их пористости, задаваемой в эксперименте, тем больше, чем крупнее фракция материала, из которого получены прессовки, а показатель пропорциональности напряжений, рассмотренный в работе, позволяет практически прогнозировать значение прочности на сжатие будущей прессовки.

На основе расчетных параметров уравнения Кольрауша построены регрессионные экспоненциальные зависимости убывания значений напряжений во времени. Установлено, что экспериментальные напряжения  $\sigma_i$ , возникающие при разгрузке уплотненного материала, снижаются несколько быстрее, чем по экспоненциальному закону, и существенные изменения  $\sigma_i$  преимущественно завершаются к 5-й и 10-й минутам выдержки под нагрузкой прессовок. Очевидно, что отсутствие напряжений на траверсе тестовой машины по завершении релаксации материала прессовки свидетельствует об устранении упругого отклика материала и сохранении размеров прессовки в рамках задаваемых размеров формообразующей полости пресс-формы.

Результаты исследований могут быть использованы при прогнозировании конечных размеров различных участков прессовок из порошков широкой линейки воскообразных материалов, что

позволит в значительной степени повысить размерную и геометрическую точность отливок из обширной номенклатуры сплавов, используемых в ЛВМ. Получение литья по рассмотренному в работе технологическому процессу предусматривает внесение изменений в последовательность операций: замену пастообразного или жидкого модельного материала на порошок из того же материала фракций 0,63–2,5 мм; прессование порошкового тела с выдержкой прессовки под нагрузкой. Экспериментальные выплавляемые модели не имеют литейных дефектов в виде усадки, поверхностной волнистости или коробления, а их структура отличается рассредоточенной пористостью, определяющей снижение деформационного воздействия на оболочковую форму при выплавлении модельной массы, повышенную стойкость форм к образованию трещин и, следовательно, рост качества литья.

## Список литературы/References

1. Dogancan Okumus, Sefer A. Gunbeyaz, Rafet Emek Kurt, Osman Turan. Towards a circular maritime industry: Identifying strategy and technology solutions. *Journal of Cleaner Production*. 2023;382:134935. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134935>
2. Gogolukhina M., Mamedova L. Organisational and economic aspects of deep modernisation and foundation projects of shipbuilding yards. *Transportation Research Procedia*. 2022;63:2072–2078. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.231>
3. Chernyshov E.A., Romanov A.D., Romanova E.A. The quality control of high-resistance steel casting by optimizing the tempering temperature. *Materials Today: Proceedings*. 2021;38(4):1488–1490. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.134>
4. Abayomi A. Akinwande, Adeolu A. Adediran, Oluwatoshin A. Balogun, Moses Ebiowei Yibowei, Abel A. Barnabas, Henry K. Talabi, Bayode J. Olorunfemi. Optimization of selected casting parameters on the mechanical behaviour of Al 6061/glass powder composites. *Heliyon*. 2022;8(5):e09350. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09350>
5. Li Changyun, Wu Shiping, Guo Jingjie, Su Yanqing, Bi Weisheng, Fu Hengzhi. Model experiment of mold filling process in vertical centrifugal casting. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006;176(1–3):268–272. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.04.004>
6. Yiping Lu, Xuzhou Gao, Li Jiang, Zongning Chen, Tongmin Wang, Jinchuan Jie, Huijun Kang, Yubo Zhang, Sheng Guo, Haihui Ruan, Yonghao Zhao, Zhiqiang Cao, Tingju Li. Directly cast bulk eutectic and near-eutectic high entropy alloys with balanced strength and ductility in a wide temperature range. *Acta Materialia*. 2017;124:143–150. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.11.016>
7. Крушенко Г.Г. Повышение качества стального литого гребного винта для пассажирского речного судна. *Судостроение*. 2016;6(829):54–57. Krushenko G.G. Improvement of quality of steel casted propeller for river passenger vessel. *Sudostroenie*. 2016;6(829):54–57. (In Russ.).
8. Марков С.П., Муктепавел В.О., Мурзин В.В. Поверхностное упрочнение судовых гребных винтов из бронзы. *Морские интеллектуальные технологии*. 2019;4-1(46):97–101. Markov S.P., Muktepavel V.O., Murzin V.V. Surface hardening of the bronze ship propeller. *Morskie intelektual'nye tekhnologii*. 2019;4-1(46):97–101. (In Russ.).
9. Абашкин Е.Е., Ткачева А.В. Влияние предварительного подогрева пластины на значения и распределение остаточных напряжений, образованных в результате наплавки. *Морские интеллектуальные технологии*. 2022;3-1(57):310–318. <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.040> Abashkin E.E., Tkacheva A.V. Study of local combined heat impact on permanent joints. *Morskie intelektual'nye tekhnologii*. 2022;3-1(57):310–318. (In Russ.). <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.040>
10. Ayar M.S., Ayar V.S., George P.M. Simulation and experimental validation for defect reduction in geometry varied aluminium plates casted using sand casting. *Materials Today: Proceedings*. 2020;27:1422–1430. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.788>
11. Pan Tao, Heng Shao, Zhijun Ji, Hai Nan, Qingyan Xu. Numerical simulation for the investment casting process of a large-size titanium alloy thin-wall casing. *Progress in Natural Science: Materials International*. 2018;28(4):520–528. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2018.06.005>
12. Kapranos P., Carney C., Pola A., Jolly M. 5.03 — Advanced casting methodologies: Investment casting, centrifugal casting, squeeze casting, metal spinning, and batch casting. *Comprehensive Materials Processing*. 2014;5:39–67. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00539-2>
13. Гаранин В.Ф., Иванов В.Н., Казеннов С.А., Курчман Б.С., Лищенко Н.Н., Озеров В.А., Рошан Н.Р., Сокол И.Б., Телис М.Я., Чулкова А.Д., Шкленник Я.И., Шкленник Л.Я. Литье по выплавляемым моделям. Под общ. ред. В.А. Озерова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1994. 448 с.
14. Радцевич Х.М. Расчет припусков и межоперационных размеров в машиностроении: Учеб. пос. М.: Высшая школа, 2004. 272 с.
15. Прокопчук Н.Р., Горшарик Н.Д., Ключев А.Ю., Коз-

- лов Н.Г., Рожкова Е.И., Латышевич И.А., Бакович Н.А. Модельные составы для точного литья. *Vesці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя хімічных навук*. 2015;(4):122–128.
- Prokopchuk N.R., Gorshcharik N.D., Klyuev A.Yu., Kozlov N.G., Rozhkova E.I., Latyshevich I.A., Bakovich N.A. Model compositions for precision casting. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk*. 2015;(4): 122–128. (In Russ.).
16. Сапченко И.Г., Жилин С.Г., Комаров О.Н. Управление структурой и свойствами пористых комбинированных удаляемых моделей. Владивосток, Дальнаука, 2007. 138 с.
  17. Foggia M.Di, 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>
  18. Оспенникова О.Г. Теплофизические и реологические характеристики синтетических смол для модельных композиций. *Литейное производство*. 2016;(10):26–28.  
Ospennikova O.G. Thermophysical and rheological characteristics of synthetic resins for model compositions. *Liteinoe Proizvodstvo*. 2016;(10):26–28. (In Russ.).
  19. Tascioglu 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>
  20. Sapchenko I.G., Zhilin S.G., Potianikhin D.A., Komarov O.N. Mesomechanics of technological properties of powdered polymer compacts in Lost Wax Casting. *AIP Conference Proceedings*. 2014;1623:543–546.  
<https://doi.org/10.1063/1.4899002>
  21. 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)(39):553–557.  
Vinokurov G.G., Popov O.N. Statistical modeling of local density macrostructure correlation at one-sided pressing of powder materials. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2011;13(1–3)(39):553–557. (In Russ.).
  22. 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. "ITHPC 2021 — Short paper proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on information technologies and high-performance computing"*. 2021. P. 148–154.
  23. Жилин С.Г., Богданова Н.А., Комаров О.Н., Соснин А.А. Снижение упругого отклика при уплотнении порошковой парафиностеариновой композиции. *Деформация и разрушение материалов*. 2020;(1):29–33.  
<https://doi.org/10.31044/1814-4632-2020-1-29-33>
  - 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;(4):459–463.  
<https://doi.org/10.1134/S0036029521040376>
  24. Dong Y.W., Li X.L., Qi Zhao, Jun Yang, Ming Dao. Modeling of shrinkage during investment casting of thin-walled hollow turbine blades. *Journal of Materials Processing Technology*. 2017;244:190–203.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.01.005>
  25. Michio Ito, Toshio Yamagishi, Yoshiki Oshida, Carlos A. Munoz. Effect of selected physical properties of waxes on investments and casting shrinkage. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 1996;75(2):211–216.  
[https://doi.org/10.1016/S0022-3913\(96\)90101-8](https://doi.org/10.1016/S0022-3913(96)90101-8)
  26. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология. Концепции, методы, приложения. М.: Профессия, 2007. 560 с.
  27. Малкин А.Я., Чалых А.Е. Диффузия и вязкость полимеров. М.: Химия, 1979. 304 с.
  28. Гальперин А.М., Шафаренко Е.М. Реологические расчеты горнотехнических сооружений. М.: Недра, 1977. 246 с.
  29. Жилин С.Г., Комаров О.Н., Потянихин Д.А., Соснин А.А. Экспериментальное определение параметров регрессионной зависимости Кольрауша для пористых прессовок из воскообразных порошковых композиций. *Инженерный журнал: Наука и инновации*. 2018;2(74):9.  
<http://doi.org/10.18698/2308-6033-2018-2-1732>
  - Zhilin S.G., Komarov O.N., Potyanikhin D.A., Sosnin A.A. Experimental determining parameters of Kohlrausch regression dependence for porous compacts from waxy powder compositions. *Inzhenernyi zhurnal: Nauka i innovatsii*. 2018;2(74):9. (In Russ.).  
<http://doi.org/10.18698/2308-6033-2018-2-1732>
  30. Жилин С.Г., Богданова Н.А., Комаров О.Н. Влияние параметров уплотнения порошкового тела из воскообразного материала на формирование остаточных напряжений прессовки. *Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния*. 2019;3(41):110–121.  
<http://doi.org/10.26293/chgpu.2019.41.3.009>
  - Zhilin S.G., Bogdanova N.A., Komarov O.N. Influence of parameters of the compacting of powder body from wax-like material on the forming of residual stresses of pressing. *Vestnik Chuvashskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. I.Ya. Yakovleva. Seriya:*

- Mekhanika predelnogo sostoyaniya*. 2019;3(41):110–121. (In Russ.). <http://doi.org/10.26293/chgpu.2019.41.3.009>
31. Павлов В.И., Аскадский А.А., Слонимский Г.Л. Графоаналитический способ расчета механических характеристик материала по реакции напряжения при постоянной деформации. *Механика полимеров*. 1965;(6):16–19.  
Pavlov V.I., Askadskii A.A., Slonimskii G.L. Graph-analytical method for calculating the mechanical characteristics of a material by stress relaxation at constant deformation. *Mekhanika polimerov*. 1965;(6):16–19. (In Russ.).
  32. Прибытков Г.А., Коржова В.В., Коростелева Е.Н. Прочностные свойства и особенности разрушения композитов систем Al–Cr и Al–Cr–Si, полученных горячим уплотнением порошковых смесей. *Деформация и разрушение материалов*. 2013;(8):13–20.  
Pribytkov G.A., Korzhova V.V., Korosteleva E.N. Strength properties and features of destruction of composites of Al–Cr and Al–Cr–Si systems obtained by hot compaction of powder mixtures. *Deformatsiya i razrushenie materialov*. 2013;(8):13–20. (In Russ.).
  33. Nicole K. Aragon, Sheng Yin, Hojun Lim, Ill Ryu. Temperature dependent plasticity in BCC micropillars. *Materialia*. 2021;19:101181.  
<https://doi.org/10.1016/j.mtla.2021.101181>
  34. Remo N. Widmer, Alexander Groetsch, Guillaume Kermouche, Ana Diaz, Gilles Pillonel, Manish Jain, Rajaprakash Ramachandramoorthy, Laszlo Pethö, Jakob Schwiedrzik, Johann Michler. Temperature-dependent dynamic plasticity of micro-scale fused silica. *Materials & Design*. 2022;215:110503.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110503>

## Информация об авторах

**Сергей Геннадьевич Жилин** — к.т.н., доцент, вед. науч. сотрудник лаборатории проблем создания и обработки материалов и изделий Института машиноведения и металлургии (ИМиМ) ДВО РАН.  
<https://orcid.org/0000-0002-0865-7109>  
E-mail: sergeyzhilin1@rambler.ru

**Нина Анатольевна Богданова** — мл. науч. сотрудник лаборатории проблем создания и обработки материалов и изделий ИМиМ ДВО РАН.  
<https://orcid.org/0000-0002-8769-8194>  
E-mail: joyful289@inbox.ru

**Олег Николаевич Комаров** — к.т.н., доцент, директор ИМиМ ДВО РАН.  
<https://orcid.org/0000-0002-7121-4271>  
E-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru

## Information about the authors

**Sergey G. Zhilin** — Cand. Sci. (Eng.), Associate Prof., Leading Researcher, Laboratory for the Problems of Creation and Processing of Materials and Products, Institute of Machinery and Metallurgy of Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.  
<https://orcid.org/0000-0002-0865-7109>  
E-mail: sergeyzhilin1@rambler.ru

**Nina A. Bogdanova** — Junior Researcher, Laboratory of Problems of Creation and Processing of Materials and Products, Institute of Machinery and Metallurgy of Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.  
<https://orcid.org/0000-0002-8769-8194>  
E-mail: joyful289@inbox.ru

**Oleg N. Komarov** — Cand. Sci. (Eng.), Associate Prof., Director of Institute of Machinery and Metallurgy of Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.  
<https://orcid.org/0000-0002-7121-4271>  
E-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru

## Вклад авторов

**С.Г. Жилин** — определение цели работы, участие в обработке экспериментальных данных и обсуждении результатов, написание статьи.

**Н.А. Богданова** — проведение экспериментов, участие в обработке экспериментальных данных и обсуждении результатов.

**О.Н. Комаров** — участие в обработке экспериментальных данных и обсуждении результатов.

## Contribution of the authors

**Sergey G. Zhilin** — determination of the purpose of the work, participation in the processing of experimental data and discussion of the results, writing the article.

**Nina A. Bogdanova** — conducting experiments, participation in the processing of experimental data and discussion of the results.

**Oleg N. Komarov** — participation in the processing of experimental data and discussion of the results.

Статья поступила в редакцию 23.03.2023, доработана 06.04.2023, подписана в печать 10.04.2023

The article was submitted 23.03.2023, revised 06.04.2023, accepted for publication 10.04.2023