

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

## РАСЧЕТНОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ПОРИСТОЙ ПРЕССОВКИ ИЗ ПОРОШКОВОГО ВОСКООБРАЗНОГО МАТЕРИАЛА

*Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия*

**Аннотация.** Актуальной проблемой современного машиностроения является получение литых высокой размерной точности и неограниченной геометрии, обеспечиваемых за счет новых технологических процессов, позволяющих реализовать принципы ресурсо- и энергоэффективности. Высокий коэффициент использования материалов в таких процессах обеспечивается, в том числе, точностью получаемых изделий, благодаря чему снижается объем механической обработки литых. Одним из вариантов технологического решения отмеченной проблемы является применение процесса прессования однокомпонентных порошков воскообразных материалов при формировании точных пористых удаляемых моделей, поверхность которых не имеет тепловых усадочных дефектов. Соответствие обозначенным выше принципам эффективности данному процессу обеспечивает возможность комплексной реализации проблем литых, характерных для большей части технологических этапов. Малоизученным аспектом процесса уплотнения порошков модельных материалов является напряженно-деформированное состояние формирующихся прессовок, определяющее необходимость поиска вариантов устранения упругого отклика материала. В работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния состава уплотняемого материала на величину остаточных напряжений, предназначенные для корректного расчета геометрии пресс-форм при их проектировании.

**Ключевые слова:** прессование, порошок технического парафина, пористость, деформация, остаточные напряжения, время релаксации, размерно-геометрическая точность, упругий отклик, двухпараметрическая зависимость Кольрауша, литые по выплавляемым моделям

DOI: 10.37972/chgpu.2022.53.3.004

УДК: 621.74.045:53.09

---

© Жилин С. Г., Богданова Н. А., Комаров О. Н., 2022

*Жилин Сергей Геннадьевич*

**e-mail:** sergeyzhilin1@ Rambler.ru, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия.

*Богданова Нина Анатольевна*

**e-mail:** joyful289@inbox.ru, младший научный сотрудник, Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия.

Работа выполнена в рамках государственного задания ХФИЦ ДВО РАН.

Поступила 20.09.2022

## Введение

В настоящее время в России и за рубежом одним из наиболее востребованных методов получения отливок сложной конфигурации с тонкими стенками и поднутрениями, с размерами, соответствующими 3-8-му классам точности, является литье по выплавляемым моделям [1, 2].

Последовательность технологических операций при осуществлении рассматриваемого процесса упрощенно можно свести к следующим этапам: формирование выплавляемой модели заливкой жидкой модельной массы в пресс-форму; формирование модельного блока и последовательное нанесение на него слоев огнеупорной керамической оболочковой формы и их сушка; выплавление материала модельного блока из керамики с последующей ее прокалкой; заливка оболочек расплавом металла; механическая обработка литья. Обширная номенклатура материалов, применяемых для осуществления рассматриваемого процесса, а также значительное количество операций в известной степени определяют недопустимость мероприятий, направленных на устранение ряда неблагоприятных результатов теплофизических явлений, сопровождающих процесс. К числу таких явлений следует отнести изменения объемов модельных материалов, сопровождающих их рост, или снижение температур на стадиях расплавления или охлаждения. Негативное влияние отмеченных факторов проявляется в появлении усадочных раковин на поверхности выплавляемых моделей (на стадии охлаждения модельной массы), а также снижении трещиностойкости керамических форм (в результате расширения модельной массы при выплавлении, приводящее к увеличению объема модельной массы до 10-14 %, а также при прокалке керамики). Отмеченное выше, в совокупности, определяет актуальность исследования и разработки методов сокращения затрат на механическую обработку заготовок при получении отливок повышенной размерно-геометрической точности, осуществляемого на протяжении продолжительного времени [3].

Поиск вариантов устранения отмеченных недостатков такого метода формирования литых изделий определил ряд перспективных направлений, активно развивающихся в последнее время. Значительная доля таких направлений связана, в первую очередь с осуществлением возможности получения выплавляемой модели сложной пространственной конфигурации посредством применения аддитивных подходов к формообразованию [4]. Безусловным достоинством отмеченного альтернативного подхода является то, что геометрия формируемых изделий ограничена лишь техническими параметрами и габаритами оборудования. Однако перспектива широкого применения таких методов для серийного получения изделий в настоящее время представляется весьма неопределенной ввиду длительности процесса, требований к оборудованию, определяющему узкий диапазон физических условий экструзии модельного материала и формирования слоев изделия. Кроме того, послойное формирование определяет шероховатость поверхности изделия и необходимость дополнительной обработки [5, 6].

Из отмеченного выше становится очевидным, что решение проблемы формирования поверхностных пороков и усадочных дефектов заключается преимущественно в

---

*Комаров Олег Николаевич*

e-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru, кандидат технических наук, доцент, директор, Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия.

соблюдении температурного режима, при котором модельный материал по ходу технологического процесса не нагревается выше температуры плавления. Такое условие может быть обеспечено в ходе реализации экспериментального процесса за счет формирования тела выплавляемой модели прессованием порошка модельной композиции без подведения внешних источников тепла [7]. В процессе уплотнения порошка воскообразной модельной композиции в результате давления происходит оплавление пограничных участков частиц деформируемого порошкового тела с достаточно скоротечным охлаждением зоны контакта, что обеспечивает каркасную структуру прессовки с распределенной внутри нее пористостью, величина которой достигает 14 %. Качество поверхности выплавляемых прессованных моделей в значительной степени определяется шероховатостью формообразующих элементов пресс-матрицы [8]. К технологическим преимуществам использования пористых моделей следует отнести повышение трещиностойкости керамических оболочковых форм ввиду отсутствия расширяющего воздействия на внутренние стенки керамики нагреваемой модельной массы при ее выплавлении.

При формировании прессовки простой геометрии, с соразмерными сторонами, как правило проявление внешних дефектов не наблюдается. Однако, при получения прессовок сложной конфигурации с разнотолщинными участками, возможно появление отклонений от заданной геометрии изделия в результате упругого разгрузки уплотненного модельного материала. Это обстоятельство стало препятствием для массового использования нового процесса в условиях производства, особенно для конфигураций изделий с наличием переменных сечений. В ходе серии экспериментов установлены значения упругого отклика воскообразного материала прессованной модели. Остаточные напряжения в материале прессовки приводят к увеличению ее размеров прессованной на 0,4-1,2 % [9]. При этом меньшие значения характерны для упругого последействия материала в направлении поперечном прессованию и, соответственно, более высокие значения этого показателя характерны для направления прессовки совпадающего с треком перемещения пресс-пуансона. Ясно, что на конечную геометрию прессовок влияют скорость деформирования материала и время его выдержки в уплотненном состоянии [10, 11], позволяющее завершиться процессам разгрузки напряжений.

В настоящее время как для отечественной, так и для зарубежной практики получения прессовок из п-порошковых систем характерны подходы, преимущественно основанные на описании процессов формоизменения материалов, обладающих заметно большей пластичностью в сравнении с порошками железоуглеродистых сплавов [12–14]. Безусловно, опираясь лишь на методики, применимые к описанию процессов пластификации порошков конструкционных материалов, достоверность прогнозирования конечных свойств прессовок из воскообразных порошков представляется затруднительной задачей, что определяет актуальность осуществления экспериментальных исследований, направленных на определение параметров процесса формирования из них пористой прессовки.

### **Цели и задачи**

Целью настоящей работы является определение совокупного влияния ряда параметров процесса прессования материала, состоящего из фракций порошков парафина, на величину остаточных напряжений и значения упругого последействия прессовки. Результаты цели настоящей работы достигались решением следующих задач: - определение условий получения прессовок с заданным диапазоном значений пористости

посредством регулирования фракции воскообразного материала деформируемого порошкового тела; - определение вариантов управления величиной остаточных напряжений материала прессовки посредством регулирования времени ее пребывания под нагрузкой.

**Методы и подходы** При формировании экспериментальных прессовок использован парафин очищенный технический марки Т1, согласно ГОСТ 23683-89 «Парафины нефтяные твердые. Технические условия» фракций 0,63 мм и 2,5 мм. Этот компонент является основой значительной части воскообразных материалов 1-ой классификационной группы [15]. ГОСТ 23683-89 для материала марки Т1 регламентирует температуру плавления 52-58 °С, однако, реальные характеристики используемого в исследовании материала отличны от значений ГОСТ и определены экспериментально. Температура плавления уточнена в ходе нагрева материала Т1 со скоростью 2 °С/мин дифференциально-термическим анализатором Shimadzu DTG-60H и составила 60 °С (температура окружающей среды в момент проведения эксперимента  $20 \pm 2$  °С) [16]. Определение такой физической характеристики материала Т1, как модуль Юнга (Е), осуществляли при помощи тестовой машины AG-Xplus фирмы SHIMADZU, достоверность экспериментальных значений которой обеспечивается значением отклонения от задаваемой нагрузки в интервале 0÷100 кН не более чем на 0,03 %. Для материала марки Т1 определен модуль Юнга  $E_{T1} = 81,91$  МПа [17]. Значение плотности материала, характерное для состояния его свободной заливки, составило  $\rho_{T1} = 0,86$  г/см<sup>3</sup>.

Технологически приемлемый диапазон размеров фракции применяемого воскообразного материала марки Т1 определен в ходе серии предварительных экспериментов, обусловлен особенностями формирования тонкостенных участков прессовок и составляет 0,63-2,5 мм. Частицы фракций Т1 получены рассевом стружки на ситах модели 026 и имеют хлопьевидную форму. Применение известных методов расчета конечных свойств прессовок, формирующихся из порошковых тел, предполагает сферическую форму составляющих их элементов, а также условное деление процесса уплотнения на этапы структурной деформации уплотняемой смеси, роста давления без увеличения плотности, с последующей пластической деформации [18, 19]. На рис.1 представлены условные стадии уплотнения порошкового тела, рассматриваемые в ходе настоящего исследования. В условиях реального эксперимента передача нагрузки от одного элемента порошкового тела другому в объеме будущей прессовки осуществляется неравномерно, а стадии уплотнения накладываются друг на друга. В этой связи в эксперименте регистрация нагрузки, возникающей при уплотнении порошкового тела, начинается с третьей стадии, когда в порошковом теле отсутствуют арки, а упаковка элементов условно представляет собой кубическую или гексагональную системы. Для организации такой упаковки элементов в уплотняемом теле материал Т1 в виде порошка загружали в стальную цилиндрическую пресс-матрицу диаметром  $d = 43,3$  мм, как показано на рис.1,а. После засыпки в пресс-матрицу порошка модельного состава, для устранения «воздушных арок», его подвергали предварительной механической утряске с частотой 3,5 Гц в течение 5 минут. Время утряски определено в ходе предварительных экспериментов. Как правило после 5 минут утряски высота порошкового тела в пресс-матрице, а следовательно и его плотность, не изменяется. Полученную высоту порошкового тела, характеризующегося пористостью  $P_{0i}$  (до прессования), обозначим  $h_{0i}$  и считаем начальной. Таким образом, горизонталь ограничивающая верхнюю часть порошкового тела, соответствующую высоте  $h_{0i}$ , представляет собой

Параметр	Фракция, мм	П <sub>нi</sub>	
		0	12
h <sub>0i</sub> , мм	0,63	103,0	89,0
	2,5	116,2	103,1
Π <sub>0i</sub>	0,63	0,57	0,57
	2,5	0,63	0,63
Δh <sub>i</sub> , мм	0,63	58,7	44,7
	2,5	71,8	58,8
v <sub>i</sub> , мм/мин	0,63	59,68	50,02
	2,5	72,78	65,01
m <sub>i</sub> , г	0,63/ 2,5	54,8	48,2

Таблица 1. Параметры процесса получения прессовок из Т1

линию начала перемещения траверсы, как представлено на рис.1,б. Начальная высота h<sub>0i</sub> порошкового тела зависит от массы засыпки m<sub>i</sub>.

Массы образцов m<sub>i</sub> определяем из выражения (1):

$$m_i = V \rho_i = \frac{\pi d^2}{4} h \rho_{\text{лит}} \left( 1 - \frac{\Pi_{\text{н}i}}{100\%} \right) = \frac{\pi d^2}{4} h \rho_{\text{max}} (1 - \Pi_i) \quad (1)$$

где V – конечный объем прессовки, см<sup>3</sup>; ρ<sub>i</sub> – плотность прессовки, г/см<sup>3</sup>; ρ<sub>лит</sub> – плотность материала в литом состоянии, г/см<sup>3</sup>; Π<sub>нi</sub> – параметр «недопрессовки», определяющий значение экспериментальной пористости, выражаемый в % и показывающий, на сколько плотность ρ<sub>i</sub> прессовки меньше, чем ρ<sub>лит</sub> образца того же объема; ρ<sub>max</sub> – максимальное значение плотности материала марки Т1.

В ходе эксперимента получали пористые прессовки плотностью ρ<sub>i</sub> на 0÷12 % меньшей, чем плотность материала Т1 определенная для состояния свободной заливки: ρ<sub>лит</sub> = 0,86 г/см<sup>3</sup>. Максимальное значение плотности материала марки Т1 ρ<sub>max</sub> определяли в ходе компрессионного сжатия литого цилиндрического образца при нагрузке 12 МПа в течение 10 часов на универсальной испытательной машине AG-X plus Shimadzu. Для материала марки Т1 ρ<sub>max</sub> = г/см<sup>3</sup>. В результате перемещения пресс-пуансона с высоты h<sub>0i</sub> до высоты h = d порошковое тело уплотняется до требуемой величины. При этом пористость порошкового тела составляет Π<sub>i</sub>, как показано на рис. 1,в.

Пористость образца Π<sub>i</sub> определяли из выражения (2):

$$\Pi_i = 1 - \frac{\rho_{\text{лит}} \left( 1 - \frac{\Pi_{\text{н}i}}{100\%} \right)}{\rho_{\text{max}}} \quad (2)$$

В таблице 1 представлены группы прессовок, полученные из фракций 0,63 мм и 2,5 мм материала марки Т1, их массы m<sub>i</sub> соответствовали параметру недопрессовки Π<sub>нi</sub>, значение которого принадлежит интервалу 0% ≤ Π<sub>нi</sub> ≤ 12%. Для эксперимента выбран шаг значений Π<sub>нi</sub>, составляющий 2%.

При формировании прессовки скорость движения пресс-пуансона задается траверсой тестовой машины AG-X plus Shimadzu таким образом, чтобы обеспечить условия уплотнения порошкового тела, при которых значения пористости Π<sub>i</sub> уменьшаются на равную величину за единицу времени. В данном случае каждому значению h<sub>0i</sub>,

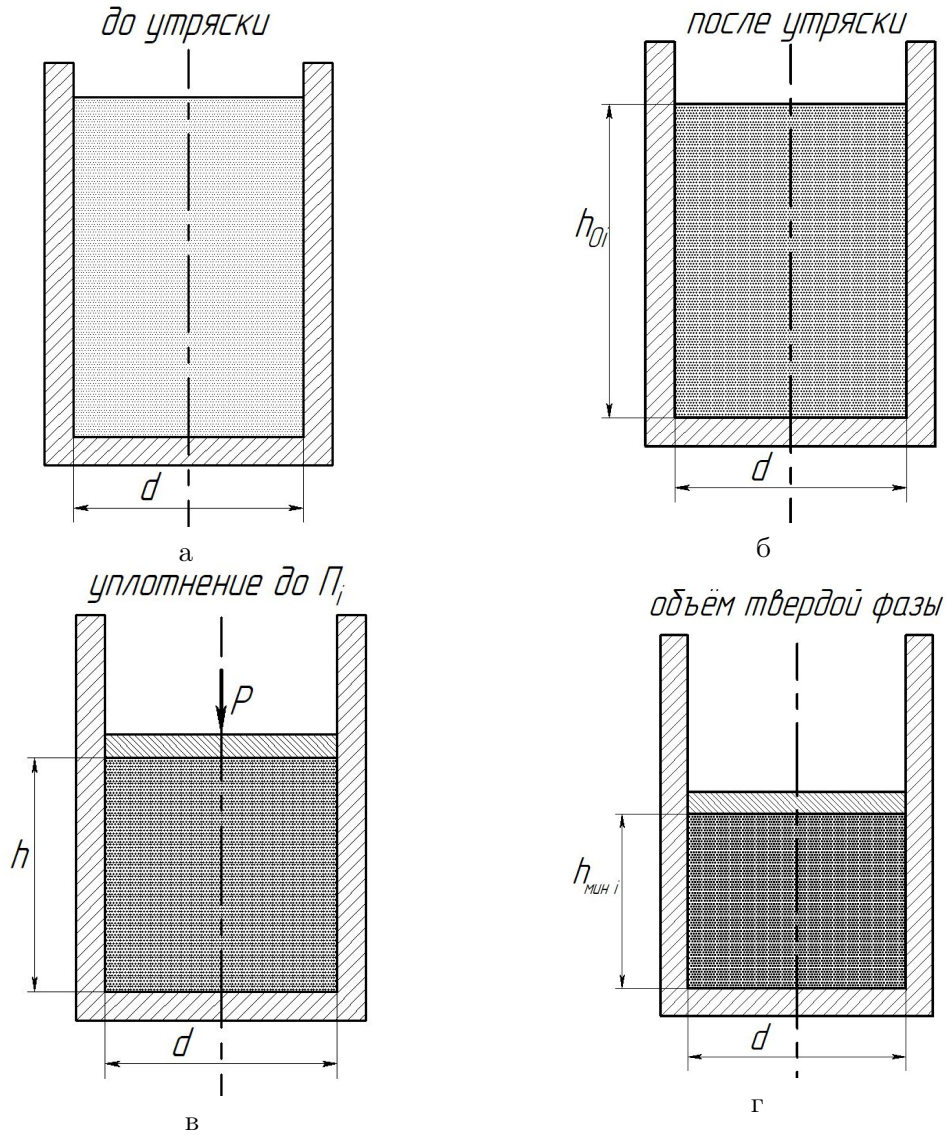


Рис. 1. Стадии уплотнения порошкового тела

будет соответствовать значению пористости  $\Pi_{0i}$ , а постоянная скорость перемещения траверсы тестовой машины при этом обеспечивает снижение пористости  $\Pi_i$  до 0 за время  $t = 60$  сек. Расчетная высота  $h_{\text{мин}i}$  для каждой навески порошкового материала, соответствует условию, когда его плотность составляет  $\rho_{\text{max}}$ , а значит  $\Pi_i = 0$ . Эти обстоятельства определяют массу навески материала, расчет которой производим согласно выражения (3):

$$h_{\text{мин}i} = \frac{m_i}{\rho_{\text{max}} S} \quad (3)$$

где  $S$  – площадь основания цилиндра формообразующей полости.

Таким образом скорость перемещения траверсы тестовой машины при уплотнении навески порошкового тела определим из условия:

$$v_i = \frac{h_{0i} - h_{\text{мини}i}}{t} = \frac{\Delta h_i}{t} \quad (4)$$

где  $\Delta h_i$  – перемещение траверсы с  $h_{0i}$  до  $h_{\text{мини}i}$ , мм.

Данные по значениям  $v_i$  для каждого  $\Pi_{\text{H}i}$  представлены в табл.1.

При достижении траверсой положения  $h = d$  образцы выдерживались в нагруженном состоянии в течение 60 минут для релаксации напряжений, возникающих в порошковом теле при уплотнении. В течение указанного времени достигается равномерное распределение плотности в прессовке за счет завершения тепловых процессов в материале марки Т1. Результатом серии экспериментов являются графические зависимости напряжений, возникающих на траверсе тестовой машины при сжатии порошкового тела и напряжений разгрузки при релаксации материала от времени его выдержки под нагрузкой, а также величины упругого отклика прессовки  $O_{\text{П}}$ . Величина  $O_{\text{П}}$  определена по формуле:

$$O_{\text{П}} = \frac{d_{\text{П}} - d}{d_{\text{П}}} 100\% \quad (5)$$

где  $O_{\text{П}}$  – величина упругого отклика, %;  $d$  и  $d_{\text{П}}$  – внутренний диаметр пресс-формы и внешний диаметр прессовки соответственно, полученные при помощи регистратора DIN863 Vogel с точностью измерения 0,001 мм.

### Результаты и обсуждение

На рис.2 в виде полиномов 3-го порядка представлены экспериментальные зависимости напряжений, регистрируемых при релаксации прессовок из материала марки Т1 фракций и 0,63 мм (кривые 1 и 2) и 2,5 мм (кривые 3 и 4) соответственно, от времени их выдержки в нагруженном состоянии, когда подвижные элементы пресс-формы сомкнуты. Кривые 1 и 3 характерны для прессовок, конечная пористость которых составляет  $\Pi_{\text{H}}=0\%$ . В свою очередь кривые 2 и 4 характерны для прессовок, конечная пористость которых составляет  $\Pi_{\text{H}}=12\%$ . На диаграмму помещены звичния величины достоверности аппроксимации  $R_2$  для каждого из рассматриваемых в эксперименте случаев.

Представленные на рис.2 экспериментальные зависимости падения напряжений при разгрузке от времени выдержки прессовки в нагруженном состоянии, соответствующие значениям  $0\% < \Pi_{\text{H}} < 12\%$  и полученные с шагом 2 %, из материала марки Т1 фракции 2,5 мм принадлежат области, ограниченной сплошными кривыми, а для материала и фракции 0,63 мм – области, ограниченной пунктирными кривыми.

Видно, что падение напряжения во всех случаях происходит по экспоненциальным кривым и к 20-ой минуте релаксации не превышают значений 0,15 МПа. Дальнейшая выдержка прессовок до 60 минут к существенному падению значений напряжений не приводит. При формировании прессовок из материала Т1 фракции 0,63 мм напряжения для случая формирования прессовки с  $\Pi_{\text{H}} = 0\%$  превышают таковые для прессовок из материала Т1 фракции 2,5 мм.

Экспериментально подтверждено, что со снижением  $\Pi_{\text{H}}$  разрыв значений напряжений, возникающих при уплотнении и релаксации материала, сокращается. Обозначим символами  $\sigma_{0,63}$  и  $\sigma_{2,5}$  напряжения начала разгрузки для прессовок из фракций 0,63 мм и 2,5 мм. Анализом напряжений  $\sigma_{0,63}$  и  $\sigma_{2,5}$ , соответствующих началу разгрузки,

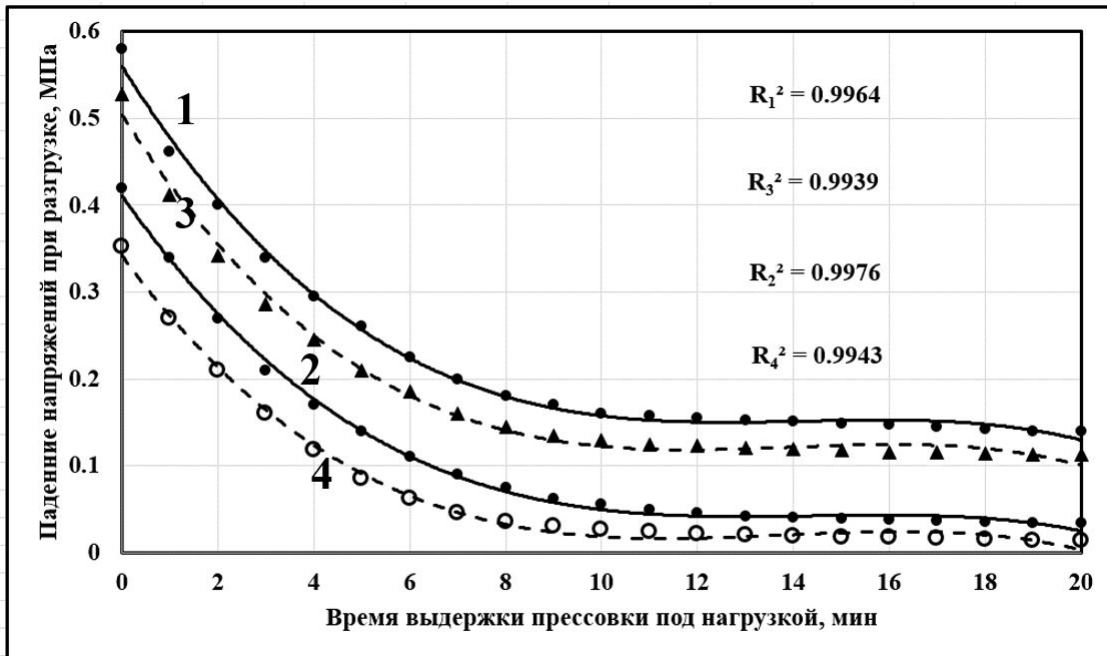


Рис. 2. Зависимости падения напряжений при релаксации уплотненных прессовок из материала марки Т1 от времени их выдержки под нагрузкой.

от  $P_n$ , установлено, что при  $P_n > 12\%$  фракция материала не оказывает влияния на величину  $\sigma$ .

Серией предварительных экспериментов установлено, что предел прочности на сжатие  $\sigma_v$  прессовок, выполненных из ряда воскообразных материалов 1-ой классификационной группы в значительной степени зависит от фракции материала. Согласно данным, представленным в [8] в интервале значений пористости сформированных прессовок  $0\% < P_n < 12\%$ , пределы прочности на сжатие  $\sigma_{v0,63}$  прессовок, полученных из воскообразных материалов фракций 0,63 мм больше таковых для  $\sigma_{v2,5}$ , полученных из материалов фракций 2,5 мм в среднем на  $19 \div 27\%$ . Значения  $O_n$ , характеризующие величину упругого отклика прессовки в направлении поперечном приложению давления не при всех вариантах  $P_n$  удовлетворяет задачам эксперимента. Выше отмечено, что в результате серии предварительных исследований установлены максимальные значения  $O_n$ , не превышающие 1,2% изменения габаритных размеров уплотненного порошкового тела в направлении вдоль оси прессования. В ходе эксперимента определено, что по завершении цикла выдержки материала под нагрузкой в течение 20 минут напряжения в прессовке хоть и остаются, но существенно не меняются в течение дальнейшего времени (до 60 минут), а максимальное значение  $O_{n1max} = 0,65\%$  для прессовки из материала марки Т1 фракции 0,63 мм  $P_n = 0,15\%$  и  $O_{n2max} = 0,64\%$  для прессовки из материала фракции 2,5 мм с  $P_n = 0\%$ . Отметим, что минимальными значениями  $O_n$  (менее 0,15 %) обладают прессовки при  $8\% < P_n < 12\%$ , полученные при значениях остаточных напряжений в материале  $\sigma_{ост} < 0,05$  МПа.

#### Заключение



Экспериментально определено влияние фракции порошкового воскообразного материала марки Т1 и времени выдержки под нагрузкой на величину остаточных напряжений и упругого последствия прессовки. Установлено время выдержки (до 20 минут) наиболее интенсивной релаксации материала. Напряжения, возникающие в ходе уплотнения порошкового воскообразного материала марки Т1 фракций 0,63 мм при  $P_n = 0\%$ , превышают таковые для прессовок из того же материала фракции 2,5. Экспериментально установлено, что минимальными значениями  $O_n \leq 0,15\%$  обладают прессовки соответствующие  $8\% < P_n < 12\%$ , полученные при алгоритме выбора скорости прессования, учитывающем параметр недопрессовки (пористости) из порошков воскообразного материала марки Т1 фракций 0,63 мм и 2,5 мм при значениях остаточных напряжений в материале  $\sigma_{ост} < 0,05$  МПа.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Получение отливок повышенной размерной точности по комбинированным литейным моделям из алюмотермитных и воскообразных смесей / С. Г. Жилин, О. Н. Комаров, А. А. Соснин [и др.] // Заготовительные производства в машиностроении. 2016. № 11. С. 6–11.
- [2] Kumar V., Mitra S. Development in investment casting // Journal of Critical Reviews. 2020. no. 7(10). P. 892–897.
- [3] Sapchenko I., Zhilin S., Evstigneev A. Investigation into the process of removing porous patterns from shell molds // Litejnoe Proizvodstvo. 2002. no. 7. P. 21–22.
- [4] Morsiya C., Pandya S. Recent Advancements in Hybrid Investment Casting Process // Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2022. P. 817–831.
- [5] Shah M., Patel D., Pande S. Additive manufacturing integrated Casting // Materials Today: Proceedings. 2016. no. 62(P13). P. 7199–7203.
- [6] Mukhtarkhanov M., Shehab E., Ali M. H. Process Parameter Optimization for 3D Printed Investment Casting Wax Pattern and Its Post-Processing Technique // Applied Sciences (Switzerland). 2022. no. 12(14). p. 6847.
- [7] Способ изготовления вылавляемых моделей / С.Г. Жилин, О.Н. Комаров, А.А. Соснин [и др.] // Патент РФ № 2632051, Заявл. 13.05.2016; Опубл. 02.10.2017, Бюл. №288.
- [8] Decrease in the elastic response in compacting a paraffin–stearin powder composition / S. Zhilin, N. Bogdanova, O. Komarov et al. // Russian Metallurgy (Metally). 2021. no. № 4. P. 459–463.
- [9] Жилин С.Г., Комаров О.Н., Соснин А.А. Моделирование процессов обработки материалов давлением на основе оценки напряженно-деформированного состояния прессовок из полимерных модельных композиций с использованием метода конечных элементов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2017. № Т. 19. № 2. С. 48–66.
- [10] Modelling of Powder die compaction / P. Brewin, O. Coube, P. Doremus et al. Springer: London, 2008.
- [11] Bogdanova N., Zhilin S., Komarov O. Influence of the packing and compaction parameters of spherical waxy elements on the stress-strain state of the compact // Procedia Structural Integrity. 2021. no. 40(C). P. 70–74.
- [12] 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. С. 13–20.
- [13] Majer M., Fries J., Machac J. Review of aluminum chips recycling // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. 2019. no. 19 (4.1). P. 771–778.
- [14] Direct recycling of aluminium chips into composite reinforced with in situ alumina enrichment / W. Abdullah, M. M. Sukri, L. M. Amri et al. // Materials Science Forum. 2020. no. 975 MSF. P. 165–170.
- [15] Литье по вылавляемым моделям / под ред. В.А. Озерова. Машиностроение: М., 1994.

- 
- [16] Жилин С.Г., Н. А. Богданова О.Н. Комаров. Влияние гранулометрического состава и скорости выдавливания воскообразной композиции на геометрию длинномерной прессовки при мундштучном экструдировании // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2018. № 4 (38). С. 54–64.
- [17] Finite element modeling of the stress-strain state of wax compact / A. Sosnin, N. Bogdanova, S.G.Zhilin et al. // AIP Conference Proceedings. Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures, MRDMS 2019 - Proceedings of the 13th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures. 2019. p. 030017.
- [18] Цеменко В.Н., Фук Д.В., Ганин С.В. Определение реологических характеристик и моделирование процесса экструзии порошковых и пористых материалов. Часть 1. Порошковое тело // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2016. № 2 (243). С. 124–133.
- [19] Либенсон Г.А., Лопатин В.Ю., Комарницкий Г.В. Процессы порошковой металлургии. Т. 2. Формование и спекание. Москва: МИСИС, 2002. 320 с.
- [20] Bagliuk G., Kuryliuk S. Numerical Analysis of the Die Forging of Porous Blanks in a Die with the Implementation of Active Friction Forces // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2021. no. 62(1). P. 119–124.

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

**CALCULATION AND EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE  
PARAMETERS OF THE PROCESS OF FORMING A POROUS COMPACT  
FROM A POWDERED WAXY MATERIAL**

*Institute of Mechanical Engineering and Metallurgy FEB RAS, Komsomolsk-on-Amur, Russia*

**Abstract.** An urgent problem of modern mechanical engineering is the production of castings of high dimensional and accuracy and unlimited geometry, provided by new technological processes that make it possible to implement the principles of resource and energy efficiency. The high utilization rate of materials in such processes is ensured, among other things, by the accuracy of the products obtained, which reduces the amount of casting machining. One of the options for the technological solution of the noted problem is the use of the process of pressing single-component powders of waxy materials in the formation of accurate porous removable models, the surface of which does not have thermal shrinkage defects. Compliance with the principles of efficiency outlined above for this process provides the possibility of a comprehensive implementation of the casting problems that are characteristic of most of the technological stages. A little-studied aspect of the process of compaction of powders of model materials is the stress-strain state of the formed compacts, which determines the need to search for options to eliminate the elastic response of the material. The paper presents the results of experimental studies of the influence of the composition of the compacted material on the magnitude of residual stresses, designed to correctly calculate the geometry of molds during their design.

**Keywords:** pressing, technical wax powder, porosity, deformation, residual stresses, relaxation time, dimensional and geometric accuracy, elastic response, two-parameter Kohlrausch dependence, investment casting.

**REFERENCES**

- [1] Obtaining castings of increased dimensional accuracy by combined casting patterns from aluminothermic and waxy mixtures / S.G. Zhilin, O.N. Komarov, A.A. Sosnin [и др.] // *Zagotovitel'nyye proizvodstva v mashinostroyenii*. 2016. № 11. С. 6–11.
- [2] Kumar V., Mitra S. Development in investment casting // *Journal of Critical Reviews*. 2020. no. 7(10). P. 892–897.
- [3] Sapchenko I., Zhilin S., Evstigneev A. Investigation into the process of removing porous patterns from shell molds // *Litejnoe Proizvodstvo*. 2002. no. 7. P. 21–22.
- [4] Morsiya C., Pandya S. Recent Advancements in Hybrid Investment Casting Process // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2022. P. 817–831.
- [5] Shah M., Patel D., Pande S. Additive manufacturing integrated Casting // *Materials Today: Proceedings*. 2016. no. 62(P13). P. 7199–7203.

---

*Zhilin Sergey Gennadevich*, Ph. D. in Engineering sciences, associate professor, Leading Researcher. Institute of Machinery and Metallurgy FEB RAS, Komsomolsk-on-Amur.

*Bogdanova Nina Anatolievna*, Junior Researcher. Institute of Machinery and Metallurgy FEB RAS, Komsomolsk-on-Amur

*Komarov Oleg Nikolaevitsch*, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Director, Institute of Mechanical Engineering and Metallurgy FEB RAS, Komsomolsk-on-Amur, Russia.

- [6] Mukhtarkhanov M., Shehab E., M.H.Ali. Process Parameter Optimization for 3D Printed Investment Casting Wax Pattern and Its Post-Processing Technique // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2022. no. 12(14). p. 6847.
- [7] Method for manufacturing investment models / S.G. Zhilin, O.N. Komarov, A.A. Sosnin [и др.] // RF patent No. 2632051, Appl. 05/13/2016; Published 02.10.2017, Bull. №288.
- [8] Decrease in the elastic response in compacting a paraffin–stearin powder composition / S. Zhilin, N. Bogdanova, O. Komarov et al. // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2021. no. № 4. P. 459–463.
- [9] Zhilin S.G., Komarov O.N., Sosnin A.A. Modeling of Processes of Machining Materials by Pressure Based on Evaluation of the Stress-Strain State of Compacts from Polymer Model Compositions Using the Finite Element Method // *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroyeniye, materialovedeniye*. 2017. № T. 19. 2. C. 48–66.
- [10] Modelling of Powder die compaction / P. Brewin, O. Coube, P. Doremus et al. Springer: London, 2008.
- [11] Bogdanova N., Zhilin S., Komarov O. Influence of the packing and compaction parameters of spherical waxy elements on the stress-strain state of the compact // *Procedia Structural Integrity*. 2021. no. 40(C). P. 70–74.
- [12] Bagliuk G., Kyryliuk S. Numerical Analysis of the Die Forging of Porous Blanks in a Die with the Implementation of Active Friction Forces // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2021. no. 62(1). P. 119–124.
- [13] Pribytkov G.A., Korzhova V.V., Korosteleva E.N. Strength Properties and Fracture Features of Al–Cr and Al–Cr–Si Composites Produced by Hot Compaction of Powder Mixtures // *Deformatsiya i razrusheniye materialov*. 2013. № 8. C. 13–20.
- [14] Majer M., Fries J., Machac J. Review of aluminium chips recycling // *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. 2019. no. 19 (4.1). P. 771–778.
- [15] Direct recycling of aluminium chips into composite reinforced with in situ alumina enrichment / W. Abdullah, M. M. Sukri, L. M. Amri et al. // *Materials Science Forum*. 2020. no. 975 MSF. P. 165–170.
- [16] Investment casting / Ed. by O. V.A. Mashinostroyeniye: M., 1994.
- [17] Zhilin S., Bogdanova N., Komarov O. Influence of particle size distribution and extrusion rate of a waxy composition on the geometry of a long-length compact during die extrusion // *Vestnik Chuvashskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. I.YA. Yakovleva. Seriya: Mekhanika predel'nogo sostoyaniya*. 2018. no. 4 (38). P. 54–64.
- [18] Finite element modeling of the stress-strain state of waxy compacts / A. Sosnin, N. Bogdanova, S.G.Zhilin et al. // *AIP Conference Proceedings. Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures, MRDMS 2019 - Proceedings of the 13th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures*. 2019. p. 030017.
- [19] Tsemenko V., Fook D., Ganin S. Determination of rheological characteristics and modeling of the process of extrusion of powder and porous materials. Part 1. Powder Body // *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*. 2016. no. 2 (243). P. 124–133.
- [20] Libenson G., Lopatin V., Komarnitsky G. Processes of powder metallurgy. Vol. 2. Forming and sintering. Moscow: MISIS, 2002. 320 p.