

## Экспериментальное определение параметров регрессионной зависимости Кольрауша для пористых прессовок из воскообразных порошковых композиций

© С.Г. Жилин, О.Н. Комаров, Д.А. Потянихин, А.А. Соснин

Институт машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения РАН,  
Комсомольск-на-Амуре, 681005, Россия

*Важной производственной задачей является получение литых заготовок с повышенными размерно-геометрическими характеристиками. Метод литья по выплавляемым моделям позволяет обеспечить получение отливок сложной конфигурации, а также дает возможность объединять отдельные детали в цельнолитые узлы. Вследствие многостадийности процесса и высокой стоимости материалов недопустим брак, суммарная величина которого в отдельных случаях может достигать трети, что обусловлено деформационными процессами, вызванными технологическими особенностями производства и свойствами используемых материалов. Один из вариантов снижения напряженно-деформированного состояния структуры выплавляемой модели — уплотнение порошков модельной массы. Однако суммарное влияние релаксации компонентов прессованной выплавляемой модели после разгрузки приводит к увеличению размеров прессовки. При этом искажение размеров получаемого изделия будет значительно ниже, чем при его изготовлении заливкой жидкого воскообразного материала. Для того чтобы определить оптимальный режим получения прессованной воскообразной модели с малым искажением размеров, требуется провести серию экспериментов по определению реологических характеристик материалов. Релаксация напряжения в условиях постоянной деформации сжатия описывается уравнением Кольрауша. В ходе эксперимента получены зависимости напряжений, которые возникают при уплотнении воскообразного тела, формируемого из порошков различных фракций, от пористости прессовок. Также установлено различие напряжений при оценке прочности прессовок с напряжениями, появляющимися при их изготовлении, и определены параметры уравнения Кольрауша для прессовки из модельного материала. Полученные результаты позволяют прогнозировать конечные размеры участков прессовок, и в дальнейшем их можно будет использовать при составлении математической модели процесса получения пористых прессованных выплавляемых моделей из применяемых в производстве модельных материалов.*

**Ключевые слова:** парафин, порошок, напряжение, литье, выплавляемая модель, реология, прочность, прессовка, пористость, упругий отклик

**Введение.** В литейном производстве важно получать заготовки с повышенными размерно-геометрическими характеристиками при сокращении материальных и временных затрат на их изготовление. Традиционный технологический процесс производства отливок сводится к созданию полости литейной формы, заливке в нее металлического расплава, извлечению полученной отливки из литейной формы,

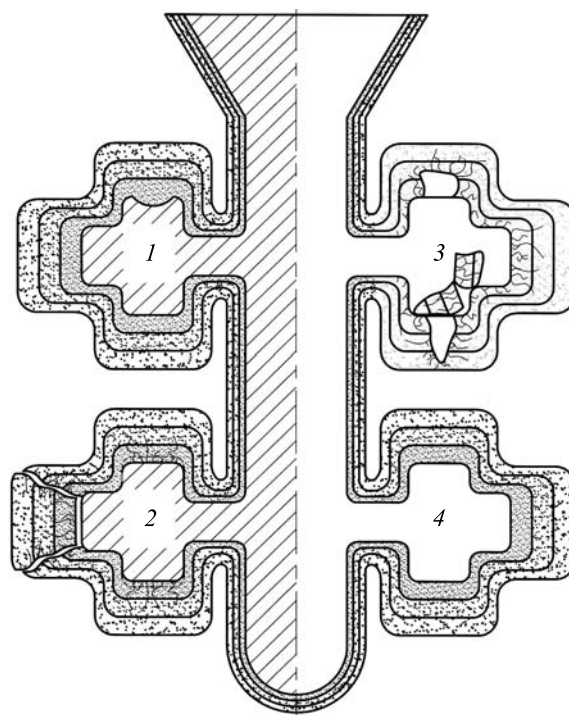
к ее освобождению от элементов литниково-питающей системы и к механической обработке. Чтобы свести к минимуму затраты, связанные с последней операцией, имеет смысл, если это допустимо, изготавливать отливки сложной конфигурации методом литья по выплавляемым моделям (ЛВМ) [1]. Он позволяет получать отливки с толщиной стенки до 1 мм, а также дает возможность объединять отдельные детали в цельнолитые узлы, уменьшать их массу и размеры. Получаемые методом ЛВМ отливки размерами до 500 мм с шероховатостью поверхности до  $Ra = 1,25$  мкм должны соответствовать 11–16 квалитетам при допусках на размеры рабочей полости пресс-формы, не превышающих 8–9 квалитетов [2]. В ряде случаев отливки, полученные методом ЛВМ, не требуют механической обработки.

Последовательность основных операций при традиционном методе ЛВМ:

- изготовление выплавляемых моделей (ВМ) и модельных блоков (МБ), включающее в себя получение расплава модельного состава (МС), его запрессовку в пресс-форму и охлаждение, механическую обработку ВМ и их сборку (преимущественно припайванием) на МБ, представляющих собой элементы литниково-питающей системы;
- изготовление оболочковой формы (ОФ) путем послойного нанесения на МБ и сушки огнеупорной суспензии с последующим выплавлением МС из застывшей ОФ в горячем теплоносителе, формовкой в опорный наполнитель и термообработкой прокаливанием;
- получение отливок в результате заливки расплава металла в ОФ и его охлаждения.

Наличие значительного числа технологических переделов, а также высокая стоимость применяемых при реализации традиционного метода материалов определяют недопустимость брака в таком производстве. В практике ЛВМ суммарный брак на перечисленных стадиях может достигать 30 % от объема всей произведенной продукции. Это обусловлено деформационными процессами, протекающими вследствие технологических особенностей производства и свойств используемых материалов [3]. На рис. 1 представлена схема ОФ с браконосными элементами, типичными для разных этапов ее образования.

Для стадий изготовления МБ с ВМ и формирования на нем ОФ характерны усадочные процессы. На этапе удаления ВМ из ОФ происходит расширяющее воздействие на нее МС, приводящее к образованию сколов и трещин. Усадочные явления в воскообразных материалах при остывании, а также исправление их последствий в большинстве случаев приводят к нарушению геометрических характеристик. В настоящее время сокращение усадки обеспечивают преимущественно подбором материалов с требуемыми реологическими свойствами и их модифицированием [4], а ВМ формируют в узком температурном интервале [5].



**Рис. 1.** Схема наличия браконосных этапов при получении отливок ЛВМ (причина брака / результат):  
1 — усадка МС / нарушение геометрии отливки; 2 — температурное расширение МС во время его выплавления / образование трещин в ОФ, нарушение геометрии отливки; 3 — расширение МС (проникшего в поры ОФ при его выплавлении) на этапе прокаливания ОФ / попадание участков ОФ в формообразующую полость, механический засор отливки, нарушение геометрии; 4 — правильная формообразующая полость ОФ без трещин, сколов и нарушения геометрии

Наклонной штриховкой на рис. 1 обозначены результаты проявления этапов 1 и 2, характеризующиеся присутствием материала МС в полости ОФ. В ряде случаев трещины в ОФ образуются на стадии ее термообработки вследствие температурных деформаций, связанных с неравномерностью прогрева, а также закипания включений МС, поступивших во внутренние слои ОФ на стадии выплавления из нее МС (см. рис. 1, этап 3). Возможно нарушение целостности керамической формы в результате газообразования продуктов разложения тяжелых предельных углеводородов парафиновой группы из материалов МБ [6], которые после удаления ВМ дополнительно выжигают из керамики [7].

Один из наиболее распространенных воскообразных материалов, применяемых для изготовления МБ, — сплав парафина и стеарина ПС

50/50 с равным содержанием данных компонентов, представляющий собой высокомолекулярное синтетическое соединение. По количественному соотношению образующих компонентов сплав ПС 50/50 относится к первой классификационной группе [1]. Физико-механические свойства этого материала зависят от его структуры, которая определяется характером взаимной укладки и строением соединенных между собой физическими межмолекулярными связями молекул. При затвердевании сплава ПС 50/50 формируется структура с относительно невысокой прочностью [8], характеризующаяся наличием трещин и сколов вследствие действия напряжений, возникающих при кристаллизации расплава. При традиционной последовательности операций повысить размерно-геометрическую точность ВМ из такого МС довольно трудно. Вариантом снижения напряженно-деформированного состояния в структуре ВМ является их формирование из порошков МС по технологии прессования, принятой в порошковой металлургии.

Данные о влиянии температуры МС при его уплотнении на пористость и механические свойства прессовок позволяют прогнозировать распределение напряжений по объему прессовки и обеспечить управляемую разность плотностей участков прессовки даже при одностороннем уплотнении [9], при котором порошковое тело уплотняется последовательно и плотность любого слоя прессовки в значительной мере определяется его состоянием на предыдущем шаге прессования [10].

Такой подход к формированию структуры прессовки из воскообразного материала позволяет получить ВМ без характерных усадочных дефектов, которые при традиционном процессе возникают в результате действия напряжений в их структуре [3, 9], а также прогнозировать температурное расширение прессовки при нагреве МС. Однако при получении прессованной ВМ сложной конфигурации с переменной толщиной различных ее участков гарантировать регламентированное различие значений плотности массивных элементов и участков с меньшей площадью поперечного сечения в ряде случаев невозможно. Сложность прогнозирования конечных размеров различных участков прессовки заключается в отсутствии данных о значении упругого отклика материала, который зависит от пористости прессованного изделия. Кроме того, по завершении релаксации материала значения таких параметров конечной прессовки, как плотность, прочность и др., несколько отличаются от расчетных [11].

В процессе уплотнения порошок МС пластифицируется под действием давления, межчастичного трения и трения о стенки пресс-формы [12], в результате чего наружная поверхность будущей ВМ приобретает конфигурацию внутренней поверхности пресс-формы.

Свободный выход находящегося под давлением воздуха, находящегося в центральных участках прессовки, затрудняется, и вследствие упругой релаксации воздуха изменяются размеры прессованной ВМ. Предварительные эксперименты показали, что суммарное влияние релаксации компонентов прессованной ВМ после разгрузки приводит к увеличению ее размеров в направлении, совпадающем с направлением прессования, на 0,7...1,2 %, в поперечном к нему — на 0,4...0,5 %. При таком способе получения ВМ ее размеры искажаются значительно меньше, чем при ее создании заливкой жидкого МС, в результате которой глубина усадочной раковины составляет 8...10 % от продольного размера изделия, выполненного из парафина, и 3...5 % для изделия из сплава ПС 50/50.

На параметры, определяющие значение упругого отклика прессованной ВМ при холодном уплотнении дисперсного МС, оказывают влияние реологические свойства последнего: упругость, пластичность, прочность, вязкость, ползучесть. Время релаксации МС прессовки зависит от скорости уплотнения, удельного давления, температуры материала, размеров фракций компонентов порошка.

Таким образом, актуальной задачей представляется минимизировать искажение линейных размеров прессованной ВМ от внутренних размеров пресс-формы, чтобы получать отливки с прогнозируемыми размерами и точностью без дополнительной механической обработки.

**Цели и задачи.** Цель работы — экспериментально определить параметры уплотнения фракций воскообразного МС прессованной ВМ, при которых достигается минимально отклонение линейных размеров ВМ от внутренних размеров пресс-формы и сохраняется технологически допустимая прочность ВМ.

В рамках поставленной цели были решены четыре задачи для определения:

- экспериментальной зависимости напряжений от пористости ВМ при формировании ВМ уплотнением порошков МС;
- разности значений напряжений при оценке прочности прессованных ВМ и напряжений, возникающих при их изготовлении;
- режима уплотнения МС, при котором будут минимально искажаться линейные размеры прессованной ВМ;
- параметров уравнения, описывающего релаксацию уплотненного МС.

**Методы решения задач и материалы.** Поставленные задачи были решены с помощью тестовой машины AG-X plus Shimadzu. Достоверность результатов эксперимента обеспечивали технические возможности тестовой машины, характеристики которой представлены в таблице.

## Тестовые характеристики машины AG-X plus Shimadzu

Параметр	Абсолютное значение		Отклонение, %
	задаваемое	фактическое	
Нагрузка, кН	0,00000	-0,00002	-0,02
	5,00000	4,99625	-0,08
	100,000	99,975	-0,03
Деформация, мм	0	0	0
	1	0,9980	-0,2
	10	9,997	-0,03

На рабочий стол тестовой машины устанавливали стальную пресс-форму, имеющую цилиндрическую внутреннюю поверхность с диаметром основания 50,15 мм. В пресс-форму засыпали навески порошка МС с фракциями размерами 0,63 мм и 2,5 мм и перемещали пресс-пуансон до отметки отношения высоты прессовки к ее диаметру 1:1, затем измеряли напряжения в течение 60 мин. Схема нагружения и релаксации МС, а также схема пресс-формы в положении, соответствующем началу релаксации  $t_0$ , представлены на рис. 2. Скорость деформации во всех случаях составляла 1 мм/с. Значение деформации  $\varepsilon$  в серии экспериментов изменялось в зависимости от требуемой конечной пористости  $\Pi$  прессованной ВМ в диапазоне  $0 \leq \Pi \leq 14\%$  с шагом 2 %. Максимальное значение пористости соответствует прессовке с низкой прочностью. Эксплуатировать ВМ с пористостью более 14 % нецелесообразно.

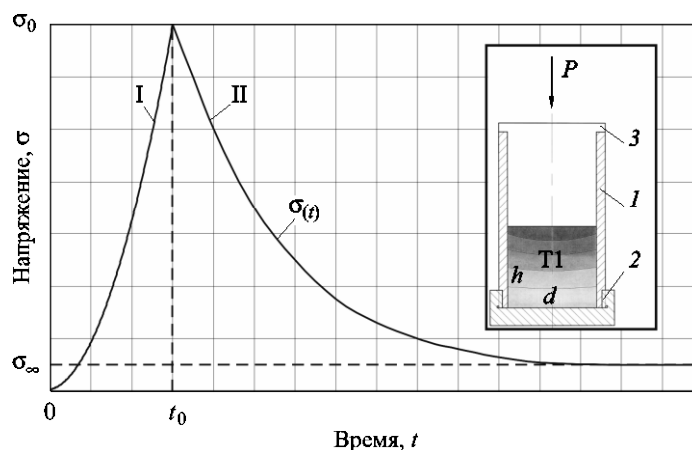


Рис. 2. Нагружение и релаксация прессовки при одноосном уплотнении:

I — кривая нагружения; II — кривая релаксации материала;  
 I — жесткая пресс-матрица; 2 — нижняя крышка; 3 — пресс-пуансон

Пористость прессовки рассчитывали по формуле

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

где  $\rho_{\Pi}$  — плотность образца с порами,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\rho_{\text{л}}$  — плотность материала, полученная при свободной заливке и затвердевании (литая плотность),  $\text{кг/м}^3$ .

В производстве используются преимущественно многокомпонентные МС, например сплавов ПС 50/50. Для сокращения погрешности в эксперименте применяли однокомпонентный материал — парафин Т1 (ГОСТ 23683–89) плотностью  $\rho_{\text{л}} = 860 \text{ кг/м}^3$ .

Массу каждой навески определяли из условия

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

где  $h$  — конечная высота прессованной ВМ, м;  $d$  — диаметр ВМ, м.

Поскольку в рассматриваемом случае  $h = d = 0,05015$  м, масса навески для каждого варианта конечной пористости прессовки из парафина Т1 определяется выражением

$$M = -0,8517\Pi + 85,191. \quad (3)$$

Напряжения в уплотняемом материале зависят от его реологических свойств и возрастают пропорционально увеличению плотности прессовки. Следовательно, основная задача сводится к достижению такого результата, при котором в ходе релаксации напряжений упругие деформации переходят в пластические (необратимые).

Реологическое поведение материала изучают теоретически и экспериментально. Релаксация напряжений в уплотненном материале определяется его реологическими свойствами, зависящими от времени выдержки при постоянной нагрузке [13].

Зависимость между действующими на прессовку напряжениями  $\sigma$ , вызываемыми деформациями  $\varepsilon$  и их изменениями во времени  $\tau$ , определяется реологическим уравнением состояния материала

$$f(\sigma, \varepsilon, \tau) = 0. \quad (4)$$

На практике реологические свойства находят экспериментально при  $\varepsilon = \text{const}$  [14]. Полученные кривые, описывающие процесс релаксации напряжений  $\sigma_{(t)}$  при постоянной деформации сжатия, имеют вид, представленный на рис. 2. В ходе деформирования МС его температура растет, локально достигая температуры каплепадения, а в процессе релаксации она снижается и материал застывает. В связи с этим для воскообразного уплотненного материала можно использо-

вать двухпараметрическое уравнение Кольрауша, применяемое при описании релаксации напряжений для области застывания полимеров при постоянной деформации сжатия, в изотермических условиях — при комнатной температуре.

Напряжение в момент времени  $t$  в уравнении Кольрауша имеет вид [15]

$$\sigma = \sigma_0 \exp^{-(t/a)^b}, \quad (5)$$

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

Расчет параметров уравнения Кольрауша, характеризующих релаксационные свойства материала, проводят с помощью экспериментальных кривых по методике, описанной в работе [15].

В рассматриваемом случае аналитическое выражение для кривой релаксации можно представить так:

$$\sigma = \sigma_0(\Pi) \exp^{-(t/\tau)^k}, \quad (6)$$

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

Параметры регрессионной зависимости  $\tau$  и  $k$  определяются методом наименьших квадратов. Если обозначим через  $\tilde{\sigma}_i$  отнесенное к  $\sigma_0(\Pi)$  экспериментальное значение напряжения в момент времени  $t_i$ , то  $\tilde{\sigma}_i = \sigma(t_i) / \sigma_0(\Pi)$ . Задача определения параметров регрессии сводится к минимизации обобщенного показателя рассеивания. Применим метод наименьших квадратов не к исходной форме экспоненциальной функции, а к преобразованной. Следует отметить, что значения  $\tilde{\sigma}_i$  лежат в диапазоне  $0 < \tilde{\sigma}_i \leq 1$ , следовательно,  $\ln \tilde{\sigma}_i \leq 0$ . Поэтому показатель рассеивания может быть представлен в виде

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

В момент начала разгрузки при  $\tilde{\sigma}_i = 1$  или, что то же самое, в момент времени  $t = 0$  выражение (7) не существует. Это необходимо учитывать при выборе экспериментальных точек. Кроме того, очевидно, что  $\exp^{-(t/\tau)^k} \Big|_{t=0} = \tilde{\sigma}(t_0) = 1$ .



Приравняв к нулю частные производные  $Q$  по  $\tau$  и по  $k$  получаем систему уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial \tau} &= 2 \sum_{i=1}^n (\ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) - k \ln(t_i/\tau)) \frac{k}{\tau} = 0, \\ \frac{\partial Q}{\partial k} &= -2 \sum_{i=1}^n (\ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) - k \ln(t_i/\tau)) \ln\left(\frac{t_i}{\tau}\right) = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Преобразовав систему (8), получим стандартную форму нормальных уравнений:

$$\begin{aligned} k \ln \frac{1}{\tau} n + k \sum_{i=1}^n \ln t_i &= \sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i), \\ k \ln \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^n \ln t_i + k \sum_{i=1}^n (\ln t_i)^2 &= \sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) \ln t_i. \end{aligned} \quad (9)$$

Решив систему уравнений (9), получаем

$$\begin{aligned} k \ln \frac{1}{\tau} &= \frac{\sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) \sum_{i=1}^n (\ln t_i)^2 - \sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) \ln t_i \sum_{i=1}^n \ln t_i}{n \sum_{i=1}^n (\ln t_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n \ln t_i\right)^2}; \\ k &= \frac{n \sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) \ln t_i - \sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) \sum_{i=1}^n \ln t_i}{n \sum_{i=1}^n (\ln t_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n \ln t_i\right)^2}. \end{aligned} \quad (10)$$

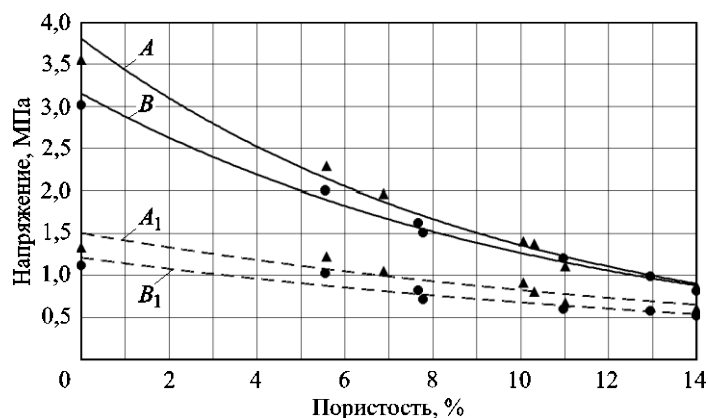
Запишем выражение для  $\tau$

$$\tau = \exp \left( \frac{\sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) \ln t_i \sum_{i=1}^n \ln t_i - \sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) \sum_{i=1}^n (\ln t_i)^2}{n \sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) \ln t_i - \sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) \sum_{i=1}^n \ln t_i} \right). \quad (11)$$

Таким образом, параметры регрессионной зависимости  $k$  и  $\tau$  для уравнения релаксации (6) определяются с помощью полученных экспериментальных данным соотношениями (10) и (11).

**Основное содержание работы.** На рис. 3 представлены данные экспериментов и экспоненциальные зависимости  $A$  и  $B$  напряжений  $\sigma_0$ , возникающих при уплотнении порошкового тела, от задаваемой в эксперименте пористости прессовки, а также зависимости  $A_1$  и  $B_1$  напряжений, возникающих при разрушении прессовок сжатием, от задаваемой в эксперименте пористости прессовки из фракций размерами 0,63 мм и 2,5 мм соответственно.

Кроме того, уравнения экспоненциальных зависимостей  $y_n$  и соответствующие им достоверности аппроксимации  $R_n^2$  также показаны на рис. 3. Для прессовок из меньшей фракции характерны более высокие напряжения, возникающие как при их уплотнении, так и в ходе разрушения сжатием. Следовательно, в среднем при увеличении фракции уплотняемых частиц в 4 раза разность в значениях напряжений при уплотнении и разрушении прессовок составляет 10...15 %.



**Рис. 3.** Зависимости напряжений  $\sigma_0$  от пористости прессовок из различных фракций парафина:

$$y_A = 3,8052e^{-0,1029x}; \quad y_B = 3,1529e^{-0,0911x}; \quad y_{A_1} = 1,4990e^{-0,0602x};$$

$$y_{B_1} = 1,2071e^{-0,0583x}; \quad R_A^2 = 0,9810; \quad R_B^2 = 0,9875; \quad R_{A_1}^2 = 0,8705;$$

$$R_{B_1}^2 = 0,9122$$

В реальных производственных условиях крайне важной является возможность прогноза прочностных характеристик изделий, получаемых на промежуточных стадиях технологического процесса изготовления конечных изделий. Полученные в ходе эксперимента данные позволяют решить эту задачу для исследуемого материала. Она сводится к оценке того, насколько значение напряжения при определении прочности прессовки (в данном случае — на сжатие) меньше возникающего при ее изготовлении, которое вычисляется с помощью показателя кратности.

Для оценки кратности значений напряжений, возникающих на поверхности прессовки при их изготовлении ( $\sigma_{изг}$ ) и при разрушении сжатием ( $\sigma_{сж}$ ), введем параметр  $N$ , рассчитываемый по формуле

$$N = (\sigma_{сж} 100 \%) / \sigma_{изг} \quad (12)$$

Зависимость параметра  $N$  от пористости прессовок из различных фракций парафина Т1 представлена на рис. 4. Видно, что с увеличением пористости в интервале значений  $0 \leq \Pi \leq 14 \%$  параметр  $N$  возрастает от 38 до 57 % для прессовок из фракции размером 2,5 мм и от 39 до 69 % для прессовок из фракции размером 0,63 мм.

Приведенные на рис. 3 и 4 данные позволяют оценить пластические свойства уплотняемого воскообразного материала. При уплотнении парафина Т1 меньшей фракции и разрушении полученной из него прессовки возникают более значительные напряжения, чем при уплотнении и разрушении прессовки из крупной фракции. С уменьшением фракции уплотняемого материала увеличивается различие значений напряжений, возникающих при уплотнении и разрушении ВМ.

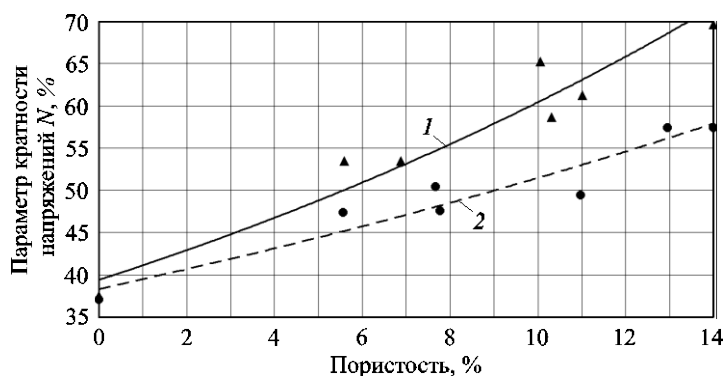


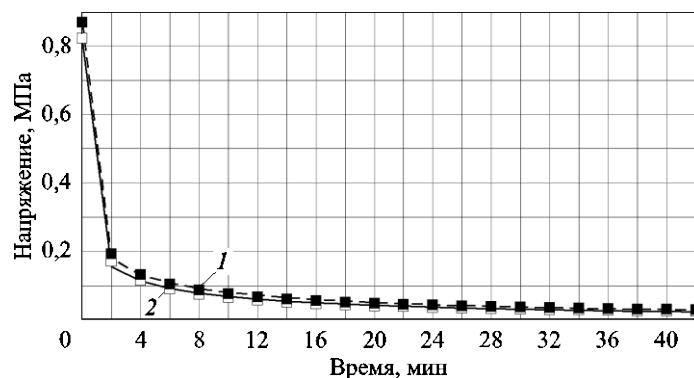
Рис. 4. Зависимость параметра кратности напряжений  $N$  от пористости прессованных ВМ из различных фракций Т1:

1 — фракция 0,63 мм,  $y_{0,63} = 39,401e^{0,0427x}$ ,  $R^2_{0,63} = 0,9351$ ;  
 2 — фракция 2,5 мм,  $y_{2,5} = 38,287e^{0,0295x}$ ,  $R^2_{2,5} = 0,9136$

Параметры уравнения Кольрауша, по которым построены кривые релаксации МС, рассчитаны по формулам (8) и (9) для случаев релаксации ВМ из фракций размерами 0,63 мм и 2,5 мм с пористостью  $0 \leq \Pi \leq 14 \%$ .

Технологически обоснованным представляется такое значение пористости прессовки, при котором ее прочностные характеристики остаются удовлетворительными. На рис. 5 представлены для сравнения экспериментальные данные и кривые релаксации материала, рассчитанные с помощью уравнения Кольрауша для прессовок с пори-

стостью  $\Pi = 14\%$ . Здесь же приведены параметры регрессионных зависимостей  $k$  и  $\tau$  для уравнения релаксации. Прочность на сжатие прессовок с такой пористостью из парафина Т1 различных фракций находится в диапазоне значений  $0,6 \dots 1,0$  МПа, что вполне достаточно для их дальнейшего технологического использования.



**Рис. 5.** Сравнение экспериментальных данных с кривыми релаксации материала, рассчитанными с помощью уравнения Кольрауша для прессовок с пористостью  $\Pi = 14\%$ :

1 — фракция 0,63 мм;  $t = 42$  мин;  $\tau = 19,82$ ;  $k = 0,26$ ; 2 — фракция 2,5 мм,  $t = 42$  мин;  $\tau = 15,83$ ;  $k = 0,25$

**Заключение.** Экспериментально установлено, что чем выше пористость прессованной ВМ, тем меньше время требуется для достижения минимального напряжения при релаксации материала в условиях постоянной деформации. В случае, представленном на рис. 5, когда ВМ имеет пористость  $\Pi = 14\%$  и обладает удовлетворительной прочностью, при увеличении времени релаксации более чем на 40 мин значительного снижения напряжений не наблюдается. При этом  $\sigma_{(40)} \approx 0,03$  МПа. Увеличение размеров прессовки в направлении, совпадающем с направлением прессования после разгрузки, не превышает  $0,68\%$ .

Для получения прессованной ВМ с повышенной размерно-геометрической точностью предпочтительнее применять мелкую фракцию МС, заполняет все поднутрения пресс-формы. Однако вследствие того, что с уменьшением фракции уплотняемого материала увеличивается различие между напряжениями, возникающими при уплотнении и разрушении, необходимо больше времени на выдержку прессовки под нагрузкой (при  $\varepsilon = \text{const}$ ) для завершения релаксации материала, чем при использовании более крупной фракции МС.

В итоге, экспериментально получены зависимости напряжений, возникающих при уплотнении воскообразного тела, изготовленного из порошков различных фракций, от пористости прессовок. Опреде-

лена разность между напряжениями при оценке прочности прессовок и напряжениями, возникающими при их изготовлении, а также составлены уравнения Кольрауша для прессовки из МС. На основании полученных результатов можно прогнозировать конечные размеры различных участков прессовок. Полученные данные можно будет применять при создании математической модели всего процесса получения пористых прессованных ВМ из широкой линейки используемых в производстве МС.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта ДВО РАН (проект 15-1-4-018) «Расчетное и опытное совершенствование процессов профилирования и высокоточного литья на основе новых модельных представлений и специальной серии вычислительных экспериментов. (Раздел 4)»*

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Озеров В.А., ред. *Литье по выплавляемым моделям*. 4-е изд., перераб. и доп. Москва, Машиностроение, 1994, 448 с.
- [2] *ГОСТ 25347–82. Основные нормы взаимозаменяемости. Единая система допусков и посадок. Поля допусков и рекомендуемые посадки*. Москва, 1983.
- [3] Сапченко И.Г., Жилин С.Г., Комаров О.Н. *Управление структурой и свойствами пористых комбинированных удаляемых моделей*. Владивосток, Дальнаука, 2007, с. 138.
- [4] Оспенникова О.Г. Теплофизические и реологические характеристики синтетических смол для модельных композиций. *Литейное производство*, 2016, № 10, с. 26–28.
- [5] Taşcıoğlu S., Akar N. Conversion of an Investment Casting Sprue Wax to a Pattern Wax by Chemical Agents. *Materials and Manufacturing Processes*, 2003, vol. 18, iss. 5, pp. 753–768.
- [6] Leushin I.O., Ul'yanov V.A., Leushina L.I. Predicting Gas-defect Formation on Changing the Investment-casting Technology. *Steel in Translation*, 2013, vol. 43, no. 11, pp. 681–683.
- [7] Углев Н.П., Пойлов В.З., Мерзляков К.С., Звездин В.Л., Шилов А.В., Ордин Д.А. Об удалении модельных масс из керамических оболочек при литье по выплавляемым моделям. *Литейное производство*, 2015, № 3, с. 17–20.
- [8] 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, vol. 1623, pp. 543–546.
- [9] Жилин С.Г., Сапченко И.Г., Комаров О.Н. Упругий отклик прессовок при деформировании гетерогенных порошковых материалов. *Вестник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева. Сер. Механика предельного состояния*, 2015, № 4 (26), с. 163–168.
- [10] Винокуров Г.Г., Попов О.Н. Статистическое моделирование корреляции локальной плотности макроструктуры при одностороннем прессовании порошковых материалов. *Известия Самарского научного центра РАН*, 2011, т. 13, № 1–3, с. 553–557.
- [11] Жилин С.Г. Комаров О.Н., Потянихин Д.А., Соснин А.А. Определение параметров логарифмического уравнения прессования для описания процес-

- са одноосного уплотнения порошкового тела из полимерного материала. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Сер. Машиностроение, материаловедение*, 2016, т. 18, № 4, с. 48–59.
- [12] Буренин А.А., Ковтанюк Л.В., Панченко Г.Л. Движение упруговязкопластической среды в круглой трубе при ее нагреве за счет пристеночного трения. *Прикладная математика и механика*, 2016, № 2, с. 265–275.
- [13] Малкин А.Я., Чалых А.Е. *Диффузия и вязкость полимеров*. Москва, Химия, 1979, 304 с.
- [14] Гальперин А.М., Шафаренко Е.М. *Реологические расчеты горнотехнических сооружений*. Москва, 1977.
- [15] Павлов В.И., Аскадский А.А., Слонимский Г.Л. *Механика полимеров*, 1965, № 6, 15 с.

Статья поступила в редакцию 30.08.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

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, вып. 2. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-2-1732>

**Жилин Сергей Геннадьевич** родился в 1977 г., окончил Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет в 1999 г. Канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории химических и фазовых превращений в материалах ИМиМ ДВО РАН. Автор 170 научных публикаций и патентов в области специальных видов литья, процессов получения стали и сплавов алюмотермией, механики деформируемых тел. e-mail: zhilin@imim.ru; sergeyzhilin1@rambler.ru

**Комаров Олег Николаевич** родился в 1979 г., окончил Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет в 2001 г. Канд. техн. наук, доцент, ведущий лабораторией химических и фазовых превращений в материалах ИМиМ ДВО РАН. Автор 140 научных публикаций и патентов в области специальных видов литья, процессов получения стали и сплавов алюмотермией, механики деформируемых тел. e-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru

**Потянихин Дмитрий Андреевич** родился в 1984 г., окончил Дальневосточный государственный университет в 2007 г. Канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаборатории и фазовых превращений в материалах ИМиМ ДВО РАН. Автор 30 научных публикаций и патентов в области механики деформируемого твердого тела, математического моделирования металлургических процессов. e-mail: potyanikhin@mail.ru

**Соснин Александр Александрович** родился в 1986 г., окончил Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет – в 2009 г. Кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории проблем металлотехнологий ИМиМ ДВО РАН. Автор 30 научных публикаций и патентов в области механики деформируемого твердого тела, машиностроительного материаловедения и процессов формирования структур металлов. e-mail: sosnin@imim.ru

## **Experimental determining parameters of Kohlrausch regression dependence for porous compacts from waxy powder compositions**

© S.G. Zhilin, O.N. Komarov, D.A. Potyanikhin, A.A. Sosnin

Institute of Machinery and Metallurgy of the Far Eastern Branch of the  
Russian Academy of Sciences, Komsomolsk-on-Amur, 681005, Russia

*Producing casting blocks with improved dimensional geometric characteristics is an important production problem. The investment casting method allows ensuring the production of complex configuration castings, and also makes it possible to combine individual parts into solid-cast assemblies. Due to the multistage process and the high cost of materials, rejects are unacceptable, however in some cases the total value of rejects may reach a third, because of deformation processes caused by technological features of production and the properties of the materials used. One of the options for reducing the stress-strain state of the investment pattern structure is the compaction of model mass powders. However, the total effect of the relaxation of the components of the pressed investment pattern after unloading results in compact dimensions increase. At the same time, the distortion of the resulting product dimensions will be significantly lower than when it is made by pouring a liquid waxy material. To find the optimal mode for obtaining a pressed waxy model with a small size distortion, it is necessary to perform a series of experiments determining the rheological characteristics of the materials. Relaxation of stress under conditions of constant compression deformation is described by the Kohlrausch equation. In the course of the experiment, the relationship between the stresses that arise when compacting the waxy body formed from the powders of various fractions and porosity of the compacts was obtained. Assessing the strength of compacts with stresses that appear during their manufacture, difference in stresses is found and the parameters of the Kohlrausch equation for a compact from a model material are determined. The obtained results allow predicting the final dimensions of the compact sections, and in the future they can be used to compile a mathematical model for the process of obtaining porous pressed investment patterns from the model materials used in foundry.*

**Keywords:** *paraffin, powder, stress, casting, investment pattern, rheology, strength, compact, porosity, elastic response*

### REFERENCES

- [1] Ozerov V.A., ed. *Litye po vyplavlyаемым modelyam* [Investment casting]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1994, 448 p.
- [2] GOST 25347–82. *Osnovnye normy vzaimozamenyaemosti. Edinaya sistema dopyskov i posadok. Polyа dopuskov i rekomenduemye posadki* [State Standard 25347–82. Basic norms of interchangeability. Unified system of tolerances and fits. Tolerance zones and recommendable fits]. Moscow, 1983.
- [3] Sapchenko I.G., Zhilin S.G., Komarov O.N. *Upravlenie strukturoy i svoystvami poristykh kombinirovannykh udalyaemykh modeley* [Control of the structure and properties of porous combined removable models]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2007, pp. 138.
- [4] Ospennikova O.G. *Liteynoe proizvodstvo — Foundry. Technologies and Equipment*, 2016, no. 10, pp. 26–28.
- [5] Taşcioğlu S., Akar N. *Materials and Manufacturing Processes*. 2003, vol. 18, no. 5, pp. 753–768.

- [6] Leushin I.O., Ulyanov V.A., Leushina L.I. *Steel in Translation*, 2013, vol. 43, no. 11, pp. 681–683.
- [7] Uglev N.P., Poilov V.Z., Merzlyakov K.S., Zvezdin V.L., Shilov A.V., Ordin D.A. *Liteynoe proizvodstvo — Foundry . Technologies and Equipment*, 2015, no. 3, pp. 17–20.
- [8] Sapchenko I.G., Zhilin S.G., Potyanikhin D.A., Komarov O.N. Mesomechanics of Technological Properties of Powdered Polymer Compacts in Lost Wax Casting. *AIP Conference Proceedings*, 2014, vol. 1623, pp. 543–546.
- [9] Zhilin S.G., Sapchenko I.G., Komarov O.N. *Vestnik Chuvashskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. I.Ya. Yakovleva. Ser. Mekhanika predelnogo sostoyaniya — Bulletin of the Yakovlev Chuvash State Pedagogical University. Series: Mechanics of Limit State*, 2015, no. 4 (26), pp. 163–168.
- [10] Vinokurov G.G., Popov O.N. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN — Izvestiya of the Samara scientific center of RAS*, 2011, vol. 13, no. 1–3, pp. 553–557.
- [11] Zhilin S.G., Komarov O.N., Potyanikhin D.A., Sosnin A.A. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Ser. Mashinostroenie, materialovedenie — Bulletin of Perm national research polytechnic university. Series: Mechanical engineering, materials science*, 2016, vol. 18, no. 4, pp. 48–59.
- [12] Burenin A.A., Kovtanyuk L.V., Panchenko G.L. *Prikladnaya matematika i mekhanika — Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 2016, no. 2, pp. 265–275.
- [13] Malkin A.Ya., Chalykh A.E. *Diffuziya i vyazkost polimerov* [Diffusion and viscosity of polymers]. Moscow, Khimiya Publ., 1979, 304 p.
- [14] Galperin A.M., Shafarenko E.M. *Reologicheskie raschety gornotekhnicheskikh sooruzheniy* [Rheological analysis of mining structures]. Moscow, 1977.
- [15] Pavlov V.I., Askadsky A.A., Slonimsky G.L. *Mekhanika polimerov — Polymer Mechanics*, 1965, no. 6, p. 15.

**Zhilin S.G.** (b. 1977) graduated from Komsomolsk-on-Amur State Technical University in 1999. Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Leading Research Fellow, Laboratory of Chemical and Phase Transformations in Materials, Institute of Machinery and Metallurgy of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. Author of 170 research publications and patents in the field of special kinds of casting, processes of obtaining steel and alloys by alumothermy, mechanics of deformable bodies.  
e-mail: zhilin@imim.ru; sergeyzhilin1@rambler.ru

**Komarov O.N.** (b. 1979) graduated from Komsomolsk-on-Amur State Technical University in 2001. Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Head of the Laboratory of Chemical and Phase Transformations in Materials, Institute of Machinery and Metallurgy of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. Author of 140 research publications and patents in the field of special kinds of casting, processes of obtaining steel and alloys by alumothermy, mechanics of deformable bodies.  
e-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru

**Potyanikhin D.A.** (b. 1984) graduated from Far Eastern National University in 2007. Cand. Sc. (Phys.-Math.), Senior Research Fellow, Laboratory of Chemical and Phase Transformations in Materials, Institute of Machinery and Metallurgy of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. Author of 30 research publications and patents in the field of mechanics of deformable bodies, mathematical simulation of metallurgical processes. e-mail: potyanikhin@mail.ru



**Sosnin A.A.** (b. 1986) graduated from Komsomolsk-on-Amur State Technical University in 2009. Cand. Sc. (Eng.), Research Fellow, Laboratory of Problems of Metal Technologies, Institute of Machinery and Metallurgy of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. Author of 30 research publications and patents in the field of mechanics of deformable bodies, of the engineering materials science and processes of metal structure formation. e-mail: sosnin@imim.ru