

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

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ УПЛОТНЕНИЯ ПОРОШКОВОГО ТЕЛА ИЗ ВОСКООБРАЗНОГО МАТЕРИАЛА НА ФОРМИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРЕССОВКИ

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

Аннотация. Достижение конечных размеров и характеристик прессовок во многом определяется свойствами исходных материалов, степенью деформации и остаточными напряжениями в уплотненном теле после снятия нагрузки. Поскольку воскообразные материалы, преимущественно, не являются конструкционными, то сведений о напряженно-деформированном состоянии получаемых из них прессовок, не вполне достаточно для прогнозирования конечных свойств и размеров последних. Актуальность исследований в этом направлении обусловлена использованием процессов формирования прессованных литейных моделей из воскообразных композиций, применяемых в литье по выплавляемым моделям. Поверхность таких прессовок отличается отсутствием тепловых усадочных дефектов. Однако, в ряде случаев, геометрия прессовок изменяется в результате релаксации уплотненного материала. В работе представлены результаты исследований влияния фракции воскообразного материала и времени его выдержки в нагруженном состоянии на величину остаточных напряжений, которые можно использовать при проектировании пресс-форм.

Ключевые слова: прессовка, воскообразный материал, пористость, деформация, остаточные напряжения, время релаксации, размерно-геометрическая точность, упругий отклик, двухпараметрическая зависимость Кольрауша.

DOI: 10.26293/chgpu.2019.41.3.009

УДК: 621.74.045:53.09

© Жилин С. Г., Богданова Н. А., Комаров О. Н., 2019

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.

Комаров Олег Николаевич

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

Широкое распространение литья по выплавляемым моделям в машиностроении обусловлено возможностью получения сложных тонкостенных отливок с размерами соответствующими 3-8-му классам точности [1]. Реализация процесса осуществляется на нескольких основных этапах: получение выплавляемых моделей и модельных блоков, формирование на них керамических оболочек, выплавление модельного материала из оболочек, их прокатка и заливка расплавом металла.

Большое число операций, длительность процесса и высокая стоимость изделий обуславливают недопустимость брака моделей, оболочковых форм и литья в целом [2]. Этап формирования модели в традиционных процессах сопровождается возникновением усадочных дефектов, требующих исправления. Негативное влияние тепловое расширение воскообразной модельной композиции проявляется также на этапе ее выплавления из оболочковой формы. Термическое расширение модельного состава достигает 10-14 % и, в ряде случаев, приводит к частичному или полному разрушению оболочки. Таким образом, учет величины «припуска» на механическую обработку литых заготовок обусловлен как особенностями сплавов, применяемых для получения изделия, так и теплофизическими процессами, сопровождающими нагрев и охлаждение воскообразной массы [3, 4].

Формирование пористости в структуре выплавляемой модели направлено на устранение отмеченных недостатков традиционного процесса. В этой связи перспективным представляется получение этого изделия «холодным» прессованием порошкового воскообразного материала [5], механическая работа в результате уплотнения которого, переходя в тепловую, приводит к локальному повышению температуры в зоне взаимного контакта частиц материала. Управляемый нагрев компонентов порошкового тела осуществляется в направлении от периферии к его центру. По завершении процесса уплотнения прессовка представляет собой конструкцию с распределенной в структуре пористостью, величина которой может достигать 14%. Рост температуры периферийных участков прессовки в результате нагружения и нагрева позволяет получать поверхность изделия с геометрией и шероховатостью, соответствующей формообразующей полости пресс-матрицы [6]. Преимуществом такого способа получения пористости в структуре изделия является отсутствие расширения при тепловом воздействии, связанном с удалением воскообразного материала из керамической формы. К недостатку процесса следует отнести возникновение увеличения внешних размеров прессовки, вызванное релаксацией уплотненного материала после снятия нагрузки. Величина такого упругого отклика в направлении оси прессования ниже значений его тепловой усадки и составляет 0,4-1,2 % [6]. Проблемой для повсеместного использования такого процесса в машиностроении является отсутствие практических сведений о поведении материала при формовке изделий с переменной толщиной стенок и сложной пространственной конфигурацией, определяющей возникновение участков прессовки с различной плотностью и, следовательно, неконтролируемой величиной упругого отклика.

Поведение материалов при экструзии и формовке порошков металлов [7, 8, 9], полимеров [10, 11, 12] или огнеупоров [13] достаточно широко представлены в отечественных и зарубежных источниках. Ввиду того, что воскообразные материалы в

Работа выполнена в рамках государственного задания № 075-00414-19-00.
В работе принимал участие к.ф.-м.н. Потянихин Д.А.

Поступила 20.03.2019

качестве конструкционных рассматриваются крайне редко, а опыт получения прессовок из других материалов сложно интерпретировать для прогнозирования конечных свойств воскообразных прессовок исследования направленные на изучение процессов их формовки представляются в достаточной степени актуальными.

Решение проблемы перераспределения напряжений и релаксации материала заключается в подборе скорости прессования и времени выдержки прессовки в нагруженном состоянии, когда формообразующие элементы пресс-матрицы сомкнуты [14]. В ходе серии предварительных экспериментов установлено, что в условиях, когда интервал скоростей перемещения формообразующих элементов пресс-матрицы составляет 0,25–1,5 мм/сек, возможно получение прессовки с величиной упругого отклика в направлении оси нагружения, не превышающей 1,2%. Условие перемещения прессующего элемента с одинаковой скоростью для разных фракций материала или различной пористости приводит к появлению расхождения в конечных значениях плотности и, следовательно, не позволяет получать прессовки с одинаковым значением упругого отклика для всего диапазона прессовок.

Таким образом, исследование режимов получения пористой прессовки из воскообразных материалов методом «холодного» уплотнения, позволяющих понизить негативное влияние упругого отклика на размерную и геометрическую точность изделий представляет значительный интерес для промышленности. Цель работы - исследование влияния фракции воскообразного материала уплотняемого порошкового тела и времени его выдержки в нагруженном состоянии на формирование остаточных напряжений и упругого отклика получаемой прессовки.

Методы и подходы.

В качестве материала прессовок выбран воскообразный модельный сплав с равным массовым содержанием парафина и стеарина ПС50/50, соответствующий 1-ой классификационной группе [1] с температурой плавления 52°C, определенной в ходе нагрева со скоростью 2 °C/мин при помощи дифференциально-термического анализатора Shimadzu DTG-60H. В этой связи, для достоверности получаемых данных, эксперимент проводился при температуре окружающей среды 20 ± 2 °C. Технологически приемлемым диапазоном фракций воскообразного материала является 0,63–2,5 мм, определенный в ходе предварительных экспериментов, обеспечивающий формирование тонкостенных участков прессовок. Форма частиц воскообразного материала преимущественно хлопьевидная ввиду ее получения рассевом стружки ПС50/50 на ситах модели 026. Это обстоятельство обуславливает неприменимость известных методик расчета конечных свойств прессовок [13], ориентированных на использование сфероидальной формы частиц. Реальный процесс получения прессовки уплотнением порошкового тела, как правило, состоит из этапов структурной деформации тела; повышения давления без увеличения плотности с последующей пластической деформацией [14]. На реальных смесях эти этапы могут осуществляться одновременно. Регистрировать величину нагрузки при уплотнении начинают с начала деформации всего объема порошкового тела в условиях, когда смещение межчастичных контактов не происходит. Для осуществления эксперимента порошок ПС50/50 помещали в упругую цилиндрическую пресс-матрицу с диаметром основания $d = 43,3$ мм (рис.1,а). Для устранения арочных эффектов смесь подвергали механической утряске с частотой 3,5 Гц до высоты h_{0i} , соответствующей начала перемещения пресс-пуансона и зависящей от массы засыпки m_i . На рис.1,а этот процесс показан в виде отрезка со

стрелками. Уплотненное таким способом порошковое тело высотой h_{0i} до прессования имеет начальную пористость Π_{0i} .

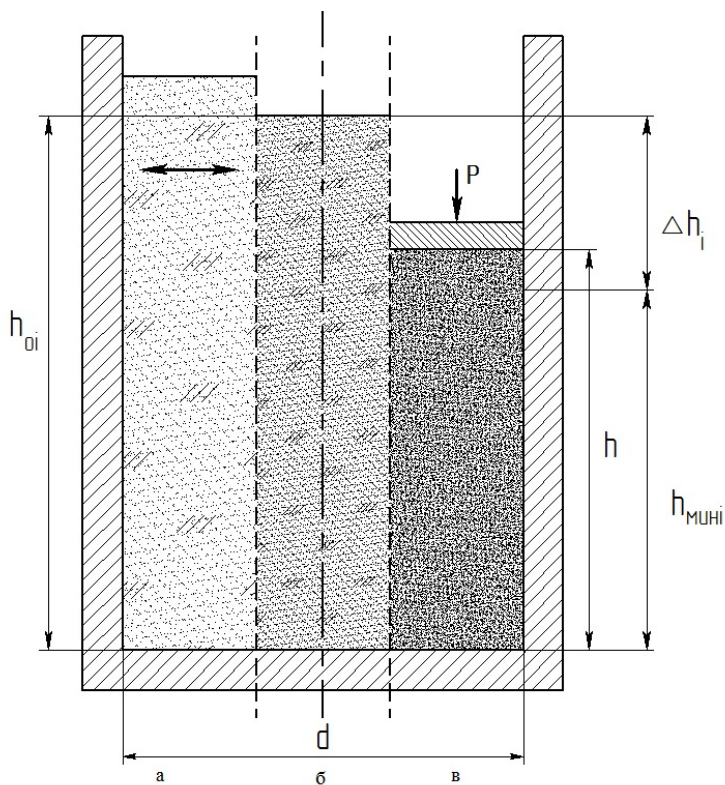


Рисунок 1. Последовательность формирования прессовки: а – состояние свободной засыпки фракции в пресс-форму; б – начало перемещения пресс-пуансона; в – завершение перемещения пресс-пуансона

Траверсу прессующего устройства с пуансоном при уплотнении модельной композиции перемещали до положения (рис. 1, в), соответствующего $h = d$ (где h – конечная высота) для получения прессовок, плотность ρ_i которых на $0 \div 12\%$ меньше плотности воскообразного материала в литом состоянии $\rho_{\text{л}} = 921 \text{ г/см}^3$. Поскольку воскообразный материал при $\rho_{\text{л}}$ имеет поры, то для корректных расчетов пористости прессовок целесообразным представляется использование значения ρ_{max} , соответствующего плотности воскообразного материала без пор. Удаление воздуха из воскообразного материала осуществляли в ходе компрессионного сжатия ПС50/50 на универсальной испытательной машине AG-X plus Shimadzu и определили $\rho_{\text{max}} = 0.942 \text{ г/см}^3$, что на $\sim 3\%$ больше чем $\rho_{\text{л}}$. Пористость i -го образца Π_i определяли из выражения:

$$\Pi_i = 1 - \frac{\rho(1 - \Pi_{Pi}/100\%)}{\rho_{\text{max}}} \quad (1)$$

где Π_{Pi} – «реальная пористость» i -го образца, %.

Из фракций 0,63 мм и 2,5 мм ПС50/50 получены группы прессовок в интервале $0\% \leq \Pi_{Pi} \leq 12\%$ с шагом 2%. Массу i -го образца m_i соответствующую i -му значению реальной пористости Π_{Pi} определяли из выражения:

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

Скорость перемещения траверсы при уплотнении, обеспечивающая снижение Π_i на равную величину за единицу времени, задается в методе испытаний тестовой машины AG-X plus Shimadzu. Таким образом, i -му значению h_{0i} , соответствует значение начальной пористости. Скорость перемещения траверсы $v_i = \text{const}$ обеспечивала снижение значения Π до нуля за время $t = 60$ секунд. Для каждой массы m_i навески ПС50/50 высота h_{mini} (рис. 1,в), соответствует полному уплотнению ($\Pi_i = 0$) и, с учетом площади S основания цилиндра формообразующей полости, рассчитывается по формуле:

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

Скорость перемещения траверсы при уплотнении i -ой навески определяли из выражения:

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

где Δh_i – условное перемещение траверсы с h_{0i} до h_{mini} , мм. Таким образом, сформированы 7 групп прессовок, характеристики которых принадлежат следующим диапазонам значений: $0\% \leq \Pi_{Pi} \leq 12\%$; $0.0223 \leq \Pi_i \leq 0.1396$; $62.9\text{г.} \leq m_i \leq 55.3\text{г.}$; $43.3\text{мм} \leq h_{\text{mini}} \leq 38,1\text{мм}$. Фракция материала существенным образом влияет на значения h_{0i} , Π_{0i} , Δh_i и v_i , которые сведены в таблицу 1. Значения в каждом из представленных интервалов распределяются линейно.

Параметры	Фракция, мм	$\Pi_{Pi}, \%$	
		0%	12%
$h_{0i}, \text{мм}$	0,63	103,0	89,0
	2,5	116,2	103,1
Π_{0i}	0,63	0,57	
	2,5	0.63	
$\Delta h_i, \text{мм}$	0,63	58,7	44,7
	2,5	71,8	58,8
$v_i, \text{мм/мин}$	0,63	59,68	50,02
	2,5	72,78	65,01

Таблица 1. Параметры прессовок

По достижении положения h траверсу фиксировали на протяжении 60 минут, 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 изменениям размеров прессовки ввиду упругого возврата О уплотненного материала, определяемого из выражения:

$$O = \frac{(d_i - d)}{d_i} \cdot 100\% \quad (5)$$

где O – упругий возврат материала, %; d и d_i – внутренний диаметр пресс-формы и высота i -ой прессовки, определяемые 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 ± 2 °С в течение 48 часов.

Аппроксимация экспериментальных данных.

При аналитическом описании процесса разгрузки напряжений, возникающих на пуансоне пресс-формы при уплотнении материала, аппроксимировали экспериментальные значения, используя двухпараметрическую зависимость Кольрауша

$$\sigma_i = \sigma_0(\Pi_i) \cdot \exp \left[-(t/\tau)^k \right] \quad (6)$$

где $\sigma_0(\Pi_i)$ – максимальное значение напряжения на пресс-пуансоне для начала разгрузки при заданной пористости Π_i . К недостатку модели Кольрауша можно отнести отсутствие физического смысла ее коэффициентов в сравнении с безразмерным временем релаксации, представленным в реологической модели Максвелла [15]. Все же модель Кольрауша позволяет точнее аппроксимировать экспериментальную кривую релаксации напряжений [16]. Для определения параметров τ и k регрессионной зависимости использовали метод наименьших квадратов, применяемый к преобразованной форме исходной экспоненциальной функции. Для перехода к относительным величинам необходимо обозначить через $\tilde{\sigma}_i$ экспериментальное значение напряжения в момент времени t_i , отнесенное к $\sigma_0(\Pi_i)$: $\tilde{\sigma}_i = \sigma(t_i)/\sigma_0(\Pi_i)$. Нормированные напряжения $\tilde{\sigma}_i$ принадлежат диапазону $0 < \tilde{\sigma}_i \leq 1$, следовательно, $\ln \tilde{\sigma}_i \leq 0$. Показатель рассеяния определяем из выражения:

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

В начале разгрузки относительное напряжение $\tilde{\sigma}_i = 1$, и выражение (7) не существует, что учитывается в регрессионном анализе при выборе экспериментальных точек. Частные производные Q по τ и k приравняем к нулю:

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

Преобразовав (8), получаем систему уравнений в нормальной форме:

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

Решаем систему уравнений (9) и получаем:

$$k \cdot \ln \frac{1}{\tau} = \frac{\sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) \cdot \sum_{i=1}^n (\ln t_i)^2 - \sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) \ln t_i \cdot \sum_{i=1}^n \ln t_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n (\ln t_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n \ln t_i \right)^2} \quad (10)$$

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

Для τ запишем следующее выражение:

$$\tau = \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) \ln t_i \cdot \sum_{i=1}^n \ln t_i - \sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) \cdot \sum_{i=1}^n (\ln t_i)^2}{n \cdot \sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) \ln t_i - \sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) \cdot \sum_{i=1}^n \ln t_i} \right) \quad (12)$$

Параметры τ и k для уравнения релаксации (6) вычисляем подстановкой данных эксперимента в выражения (10) и (11).

Обсуждение результатов

Напряжения, возникающие на траверсе тестовой машины в ходе уплотнения воскообразного материала ПС50/50 во многом зависят от его фракции и величины Π_{Pi} , изменяющейся в диапазоне $0 \div 12\%$. На рис. 2 представлены полиномиальные экспериментальные зависимости амплитуд напряжений, характерных для момента завершения уплотнения материала, когда достигается условие $h = d$, соответствующее началу разгрузки. На рис.2 представлены величины достоверности аппроксимации полиномиальных зависимостей $R_{0,63}^2$ и $R_{2,5}^2$ для фракций ПС50/50 0,63мм и 2,5 мм соответственно.

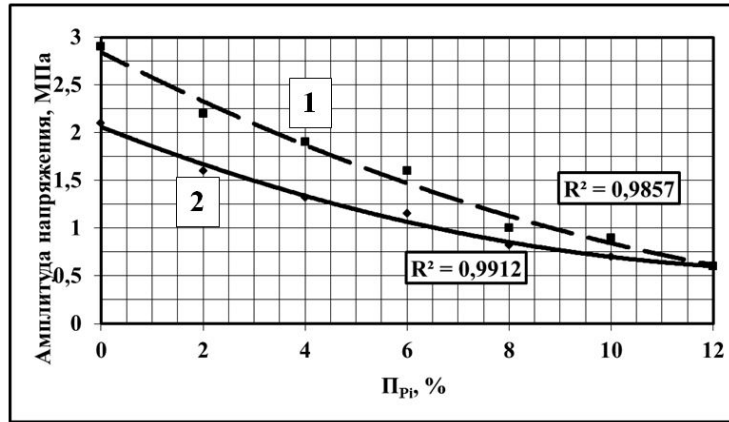


Рисунок 2. Полиномиальные зависимости амплитуд напряжений на траверсе тестовой машины в момент начала разгрузки прессовок из фракций 2,5мм (1) и 0,63мм (2) от величины Π_{Pi} .

Из рис.2 видно, что напряжения, возникающие при уплотнении крупной фракции материала выше, чем при получении прессовки из фракции 0,63, что, в целом, объясняется большей насыпной плотностью крупной фракции материала [17]. С увеличением величины Pr_i различие в значениях амплитуд напряжений для материала из разных фракций исчезают. Экспериментальные значения, характеризующие снижение напряжений на пресс-пуансоне в ходе релаксации прессовок из различных фракций ПС50/50, определенные в абсолютных величинах, за время выдержки 0÷30 минут составляют для фракций 0,63 мм и 2,5 мм $0,33 \div 0,26$ МПа и $0,45 \div 0,025$ МПа соответственно. Установлено, что напряжения разгрузки материала убывают быстрее, чем по экспоненциальному закону. В этой связи для визуализации процесса релаксации целесообразным представляется использование именно двухпараметрической зависимости Кольраушв, представленной уравнением (6), при помощи которых можно получить нормированные значения экспериментальных остаточных напряжений, характерных для диапазона 0÷60 минут времени релаксации материала прессовок с различной пористостью. Параметры релаксации τ и k присутствующие в выражении (6), получаемые по формулам (10) и (11) по отдельности для разных фракций материала, зависят от пористости. Для их определения использовались экспериментальные значения напряжений, полученные в течение 60 минут с момента начала разгрузки. Определено, что для фракции 2,5 мм $\tau = 0,0168$ и $k = 0,1611$, а для фракции 0,63 мм $\tau = 0,0147$ и $k = 0,1553$. Таким образом, параметры τ в зависимости от фракции материала различаются друг от друга на 12,5%, а k на 3,6%. В этой связи от фракции материала в большей мере зависит τ , а показатель степени k является характеристикой материала. Сравнение полиномиальных зависимостей нормированных напряжений для представлено на рисунке 3. На рис.3 также представлены величины достоверности аппроксимации полиномиальных зависимостей $R_{0,63}^2$ и $R_{2,5}^2$ для фракций ПС50/50 0,63мм и 2,5 мм соответственно. Из анализа данных рис.3 видно, что процесс релакса-

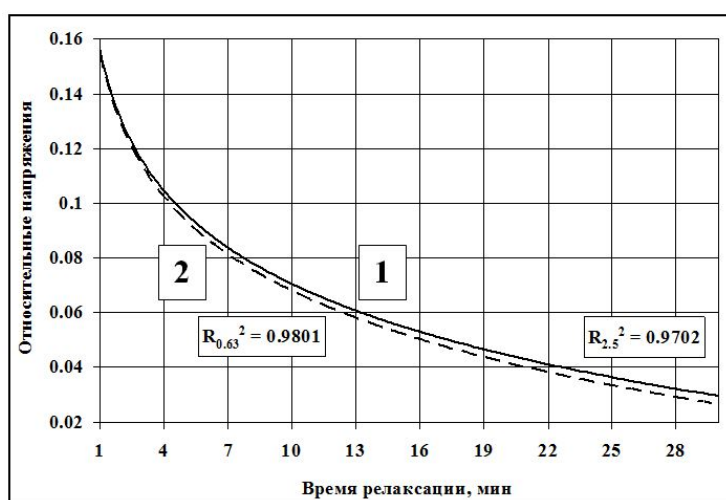


Рисунок 3. Сравнение кривых аппроксимации остаточных (безразмерных) напряжений для фракций 2,5 мм (1) и 0,63 мм (2).

ции напряжений в прессовках, полученных из меньшей фракции происходит быстрее во всем диапазоне значений Pr_i . Прессовки, получаемые из ПС50/50 фракции 2,5

более напряжены, что в немалой степени обуславливает их прочностные и размерные характеристики. Более напряженные прессовки, предположительно, будут иметь меньшую прочность и большее значение упругого возврата уплотненного материала. Экспериментально установлено, что в диапазоне значений $0\% \leq P_{Pi} \leq 12\%$ прочность на сжатие образцов из фракции 0,63 мм $\sigma_{сж0,63}$ снижается с 0,78 МПа до 0,36 МПа, а образцов из фракции 2,5 мм $\sigma_{сж2,5}$ снижается с 0,63 МПа до 0,25 МПа соответственно. Величина упругого возврата экспоненциально убывает по мере увеличения P_r , с 0 до 12% и времени выдержки материала под нагрузкой для прессовок из фракции 0,63 мм $O_{0,63}$ и составляет от 0,62% до 0,01%, а для прессовок из фракции 2,5 мм $O_{2,5}$ составляет от 0,65% до 0,02%. В целом, следует отметить, что значения $O_{0,63}$ и $O_{2,5}$ изменяются аналогично графику нормированных напряжений, представленному на рис.3, а после 30 минут выдержки существенных изменений не претерпевают.

Выводы.

В ходе эксперимента установлено, что применение крупной фракции воскообразного материала 50/50 порошкового тела приводит к росту напряжений при уплотнении, повышенным значениям остаточных напряжений и величины упругого возврата прессовки, определяющей ее геометрию. Следует отметить, что прочность таких прессовок ниже, чем при использовании фракции 0,63 мм. Интенсивное снижение величины упругого возврата материала прессовки замедляется в течение 30 минут. Фракция материала заметного влияния на величину O не оказывает.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гаранин В.Ф., Иванов В.Н., Казеннов С.А. Литье по выплавляемым моделям / под ред. В.А. Озерова. Москва: Машиностроение, 1994. 448 с.
- [2] Анализ причин брака при производстве стальных корпусных отливок посредством СКМ ЛП LVMFLOW / Т.Н. Сушко, А.С.Леднев, Т.В. Пашнева [и др.] // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. 2002. № 1. С. 26–29.
- [3] Радцевич Х.М. Расчет припусков и межоперационных размеров в машиностроении : учеб. пособие. Москва: Высшая школа, 2004. 272 с.
- [4] Модельные составы для точного литья / Н.Р. Прокопчук, Н.Д. Горщарик, А.Ю. Клюев [и др.] // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя хімічных навук. 2015. № 4. С. 122–128.
- [5] Жилин С.Г., Комаров О.Н., Соснин А.А. Моделирование процессов обработки материалов давлением на основе оценки напряженно-деформированного состояния прессовок из полимерных композиций с использованием метода конечных элементов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2017. № Том 19 №2. С. 48–66.
- [6] Жилин С.Г., Комаров О.Н., Соснин А.А. [и др.]. Способ изготовления выплавляемых моделей.
- [7] Цеменко В.Н. Фук Д.В. Ганин С.В. Определение реологических характеристик и моделирование процесса экструзии порошковых и пористых материалов. часть 3: процесс горячей экструзии // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2016. № 4 (254). С. 182–190.
- [8] Borovkov A.I. S. D. Non-linear Finite Element Modeling of the Titanium Briquettes Hot Extrusion Process // Computational Mechanics. 2004. no. 4. P. 29–35.
- [9] Modelling of Powder die compaction / P. Brewin, O. Coube, P. Doremus et al. London: Springer, 2008.
- [10] Аулов В.А. Влияние давления на интенсивность полос поглощения в ик спектрах прессованного порошка полиэтилена // Оптика и спектроскопия. 2009. Т. 106, № 2. С. 262–263.
- [11] Поведение при трении смесей несовместимых полимеров сверхвысокомолекулярного полиэтилена и полиметилметакрилата, полученных в среде сверхкритического диоксида углерода / А.П. Краснов, Э.Е. Саид-Галиев, О.В. Афоничева [и др.] // Трение и износ. 2007. Т. 28. С. 288–295.

- [12] Мурашов В.В. К вопросу определения упругих и прочностных свойств полимерных композиционных материалов акустическим комплексным методом // Деформация и разрушение материалов. 2014. № 11. С. 39–45.
- [13] 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.
- [14] Жилин С.Г. Сапченко И.Г. Комаров О.Н. Упругий отклик прессовок при деформировании гетерогенных порошковых материалов // Вестник ЧГПУ им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2015. № 4. С. 163–168.
- [15] Хохлов А.В. Нелинейная модель вязкоупругопластичности типа максвелла: общие свойства семейства кривых релаксации и ограничения на материальные функции // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2017. № 6. С. 31–55.
- [16] 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.
- [17] Жилин С.Г. Богданова Н.А. Комаров О.Н. Влияние гранулометрического состава и скорости выдавливания воскообразной композиции на геометрию длинномерной прессовки при мундштучном экструдировании // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2018. С. 54–64.

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

INFLUENCE OF PARAMETERS OF THE COMPACTING OF POWDER BODY FROM WAX-LIKE MATERIAL ON THE FORMING OF RESIDUAL STRESSES OF PRESSING

*Institute of Machinery and Metallurgy of Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences,
Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation*

Abstract. The achievement of the final dimensions and characteristics of the pressing is largely determined by the properties of the original materials, the degree of deformation, and residual stresses in the compacted body after load removal. Since wax-like materials are mainly not construction materials, information about the stress-strain state of the pressing obtained from them is not quite enough to predict the final properties and sizes of the latter. The relevance of research in this direction is due to the use of the processes of forming pressed foundry models from wax-like compositions used in investment casting. The surface of such pressing is characterized by the absence of thermal shrinkage defects. However, in some cases, the geometry of the pressing changes as a result of relaxation of the compacted material. The results of researches of effect of the fraction of the wax-like material and its exposure time in the loaded state on the value of residual stresses that can be used in the design of molds are presented in the paper.

Keywords: pressing, wax-like material, porosity, deformation, residual stresses, time of relaxation, dimensional and geometric accuracy, elastic response, two-parameter dependence of Kohlrausch.

REFERENCES

- [1] Ozerov V. A. Lost wax casting. 4th ed., Rev. and add. Moscow: Mashinostroyeniye, 1994. 448 p. (in Russian).
- [2] Sushko T.N. Lednev A.S., Pashneva TV., Rudneva I.G. Analysis of the causes of defects in the production of steel case castings by means of SCM LP LVMFLOW // Vestnik MGTU im. G.I. Nosova. 2002. No. 1. pp. 26-29. (in Russian).
- [3] H.M. Radtsevich [et al.]; under the general. ed. V.A. Timiryazev. Calculation of allowances and interoperational dimensions in mechanical engineering: textbook. Allowance. Moscow: Vysshaya shkola, 2004. 272 p. (in Russian).
- [4] Prokopchuk N.R., Gorscharik N.D., Klyuev A.Yu., Kozlov N.G., Rozhkova E.I., Latyshevich I.A., Bakovich N.A. Model compositions for precision casting // News of the National Academy of Sciences of Belarus. Series of Chemical Sciences, 2015. No. 4. pp. 122-128. (in Russian).
- [5] Zhilin S.G., Komarov O.N., Sosnin A.A. Modeling of processes for processing materials by pressure based on the assessment of the stress-strain state of compacts from polymer compositions using the finite element method // Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Engineering, materials science. 2017. Volume 19 No. 2. pp. 48-66; (in Russian).
- [6] Zhilin S.G., Komarov O.N., Sosnin A.A. Panchenko G.L. A method of manufacturing investment castings RF Patent No. 2632051. 05/13/2016; Publ. 10/02/2017, Bull. Number 28. (in Russian).
- [7] Tsemenko V.N., Fuk D.V., Ganin S.V. Determination of rheological characteristics and modeling of the extrusion of powder and porous materials. part 3: the process of hot extrusion // Scientific and

Zhilin Sergey Gennadevich, Ph. D. in Engineering Sciences, Assoc. Prof., Leading Researcher, Institute of Machinery and Metallurgy FEB RAS, Komsomolsk-on-Amur, Russia.

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

Komarov Oleg Nikolaevitsch, Ph. D. in Engineering Sciences, Assoc. Prof., Leading Researcher, Institute of Machinery and Metallurgy FEB RAS, Komsomolsk-on-Amur, Russia.

- Technical Journal of St. Petersburg State Polytechnic University, 2016. No. 4 (254). pp. 182-190. (in Russian).
- [8] Borovkov A.I., Shevchenko D.V. Non-linear Finite Element Modeling of the Titanium Briquettes Hot Extrusion Process // *Computational Mechanics*, 2004. No. 4. pp. 29-35.
- [9] Brewin P.R., Coube O., Doremus P., Tweed J.H. *Modelling of Powder die compaction*. London: Springer, 2008.
- [10] Aulov V.A. The effect of pressure on the intensity of absorption bands in the IR spectra of pressed polyethylene powder // *Optics and Spectroscopy*, 2009. V. 106. No. 2. pp. 262-263. (in Russian).
- [11] Krasnov A.P., Said-Galiev E.E., Afonicheva O.V., Stakhanov A.I., Mit V.A., Nikolaev A.Yu., Atamanov A.V., Klabukova L.F., Kalinichenko V.A., Topolnitsky O.R., Cassis M., Khokhlov A.R. The friction behavior of mixtures of incompatible polymers of ultra-high molecular weight polyethylene and polymethyl methacrylate obtained in a medium of supercritical carbon dioxide // *Friction and Wear*. 2007. V. 28. No. 3. pp. 288-295. (in Russian).
- [12] Murashov V.V. On the issue of determining the elastic and strength properties of polymer composite materials by the acoustic complex method // *Deformation and fracture of materials*. 2014. No. 11. pp. 39-45. (in Russian).
- [13] Pribytkov G.A., Korzhova V.V., Korosteleva E.N. Strength properties and fracture features of composites of Al – Cr and Al – Cr – Si systems obtained by hot compaction of powder mixtures // *Deformation and fracture of materials*. 2013. No. 8. pp. 13-20. (in Russian).
- [14] Zhilin S.G., Sapchenko I.G., Komarov O.N. The elastic response of compacts during deformation of heterogeneous powder materials // *Bulletin of the Yakovlev Chuvash State Pedagogical University. Series: Mechanics of Limit State*. 2015. No. 4. pp. 163–168. (in Russian).
- [15] Khokhlov A.V. A nonlinear model of Maxwell-type viscoelasticity: general properties of a family of relaxation curves and restrictions on material functions // *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. Natural Sciences*. 2017. No 6. pp. 31-55. (in Russian).
- [16] Zhilin S.G., Komarov O.N., Potyanikhin D.A., Sosnin A.A. Experimental determination of the parameters of the regression dependence of Kohlrausch for porous compacts from waxy powder compositions // *Engineering Journal: Science and Innovation*. 2018. no. 2. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-2-1732>. (in Russian).
- [17] Zhilin S.G., Bogdanova N.A., Komarov O.N. Influence of granulometric composition and extrusion ratio of the waxy materials on the geometry of extended compact by extrusion forming // *Bulletin of the Yakovlev Chuvash State Pedagogical University. Series: Mechanics of Limit State*. 2018. No. 4 (38). pp. 54-64. (in Russian).