

DOI: 10.15593/2224-9877/2017.2.04

УДК 621.74.045:53.09

**С.Г. Жилин, О.Н. Комаров, А.А. Соснин**Институт машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения РАН,  
Комсомольск-на-Амуре, Россия**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ  
ДАВЛЕНИЕМ НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННО-  
ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРЕССОВОК  
ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МОДЕЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЙ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

К металлоизделиям ответственного назначения со сложной поверхностью предъявляются высокие требования по размерной и геометрической точности. Их получают механической обработкой литых заготовок или обработкой массива металла. Для снижения металлоемкости производства и времени получения деталей целесообразно получать отливки литьем по выплавляемым моделям. При использовании такого метода формирование литой заготовки происходит в керамической оболочковой форме, получаемой послойным нанесением огнеупорной суспензии на модельный блок с прикрепленными моделями отливок, которые получают заливкой или запрессовкой пастообразной модельной массы в пресс-форму. Дефекты выплавляемых моделей являются следствием усадочных процессов, проходящих при охлаждении модельной массы в пресс-форме. Устранение усадочных дефектов возможно прессованием порошков модельной массы, в результате чего размеры и геометрия выплавляемой модели определяются характеристиками элементов пресс-формы, взаимодействующих с модельным составом в ходе его уплотнения. Точность пористых моделей на 1–2 качества выше, чем традиционных. Однако в объеме прессовки, в ряде случаев, возникает упругий отклик материала вследствие переуплотнения. Напряженно-деформированное состояние прессовки из полимерных материалов, применяемых для получения выплавляемых моделей в точном литье, с учетом фракционности и формы компонентов, заданных параметров деформирования определяется экспериментально. Возможность использования метода конечных элементов для прогнозирования напряженно-деформированного состояния прессовок из полимерных модельных композиций представляется актуальной. В работе приведены данные, полученные в ходе виртуального и натурального экспериментов. Рассмотрены варианты размещения элементов в пресс-форме, при которых может быть получена прессовка. На основе экспериментальных данных определены возможности использования метода конечных элементов для составления прогноза напряженно-деформированного состояния прессовки из полимерных порошковых материалов.

**Ключевые слова:** напряженно-деформированное состояние, прессование, пластическая деформация, пористость, плотность, гетерогенные материалы, размерно-геометрическая точность, упругий отклик, метод конечных элементов, моделирование технологических процессов.

**S.G. Zhilin, O.N. Komarov, A.A. Sosnin**

Institute of Machinery and Metallurgy, Far-Eastern Branch  
of Russian Academy of Sciences, Komsomolsk-na-Amure, Russian Federation

**MODELING OF PROCESSES OF PROCESSING  
OF PRESSURE MATERIALS BASED ON ESTIMATION  
OF STRESS-DEFORMED STATE OF COMPACT  
FROM POLYMER MODEL COMPOSITIONS USING  
WITH THE FINITE ELEMENTS METHOD**

There are high requirements for dimensional and geometric accuracy to metal products of responsible use with a complex surface. They are obtained by machining the cast stocks or by processing the metal mass. We need to get castings by the method of casting by the lost-wax process, to reduce the metal consumption of production and the time of obtaining parts. When using such a method, a cast preform is formed in a ceramic shell shape, which we produce by layer-by-layer application of a refractory suspension onto a model block with attached casting models. These castings are obtained by pouring or pressing a paste-like model mass into a mold. Defects in the melted models appear due to shrinkage processes that occur when the model mass is cooled in the mold. We eliminate shrinkage defects by pressing the powders of the model mass. The characteristics of the mold elements interacting with the model composition during its compaction affect the size and geometry of the produced model. The accuracy of porous models is 1-2 grades higher than that of traditional ones. Elastic response occurs in the volume of the compact due to over-consolidation. We found the stress-strain state of pressing of polymeric materials. Polymeric materials used for the production of investment patterns in precise casting. We take into account the factionalism and form of components. We use finite-element method to predict the stress-strain state of compacts of polymeric compositions model. It is an actual task. In this paper we have provided data that was obtained from the virtual and natural experiments. We considered the options for placement of elements in the mold when the compacts may be obtained. We determined whether it is possible to use the finite-element method in the prediction of the stress-strain state of compacts of polymer powder materials on the basis of data obtained during the experiments.

**Keywords:** stress-strain state, pressing, plastic deformation, porosity, compactness, heterogeneous materials, size-geometric accuracy, elastic response, finite element method, simulation of technological processes.

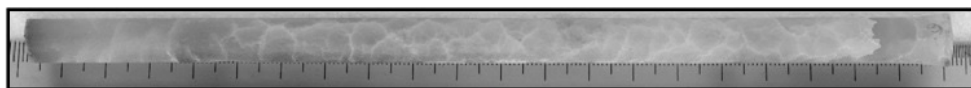
Металлоизделия ответственного назначения со сложной поверхностью, к размерной и геометрической точности которых предъявляются высокие требования, получают, как правило, механической обработкой литых заготовок или, в ряде случаев, обработкой массива металла. Стратегическими задачами сокращения производственных затрат в процессе получения готовых изделий являются снижение металлоемкости производства и сокращение времени получения деталей. Практическая реализация этой задачи возможна получением отливок повышенной размерно-геометрической точности с минимальными затратами на механическую доработку либо отсутствием таковой. Наи-

более приемлемым технологическим вариантом получения таких отливок является литье по выплавляемым моделям [1].

При производстве отливок литьем по выплавляемым моделям формирование литой заготовки происходит в керамической оболочковой форме, получаемой послойным нанесением огнеупорной суспензии на модельный блок с прикрепленными моделями отливок. Модельный блок представляет собой единую конструкцию, состоящую из элементов литниково-питающей системы и выплавляемых моделей будущих отливок. Размерно-геометрическая точность и эксплуатационные свойства выплавляемых моделей во многом определяют качество получаемых литых заготовок. Традиционно выплавляемые модели получают заливкой жидкого (или запрессовкой пастообразного) модельного материала в пресс-форму. В качестве модельного материала используют, как правило, воскообразные композиции на основе парафина с различными добавками: стеарин, церезин, буроугольный воск и т.д. [1]. Нарушение технологии получения может привести к появлению ряда дефектов выплавляемых моделей. Последнее, как правило, является следствием усадочных процессов, проходящих при охлаждении модельной массы в пресс-форме. Учет этого явления представляется важным при проектировании пресс-форм. При хранении выплавляемые модели, полученные таким способом, нередко подвержены короблению. При заливке модельной массы в пресс-форму материал протяженных (с отношением основания модели к ее высоте более чем 1 к 10) и тонкостенных (с толщиной стенки менее 1 мм) полимерных моделей при охлаждении испытывает значительные напряжения. Это находит отражение в «сетке» сквозных трещин (рис. 1, а), приводящих к снижению прочностных характеристик моделей в указанных участках.

Отмеченные дефекты не проявляются при получении выплавляемых моделей прессованием порошков модельной массы [2]. В результате этого формируется поверхность модели, размерно-геометрические характеристики которой определяются характеристиками элементов пресс-формы, взаимодействующих с модельным составом в ходе его уплотнения. Экструзией полимерного порошка можно получить тонкостенные формованные элементы моделей, протяженность которых практически не ограничена. На рис. 1, б представлен вариант получения формовки стержня круглого сечения. Целостность сформированной прессовки обеспечивается за счет появления в ходе уплотнения

порошка локальных участков, в которых достигается температура плавления материала.



*а*



*б*

Рис. 1. Протяженные элементы выплавляемой модели: *а* – полученный вертикальной заливкой парафина марки Т1 (температура заливки  $t = 60$  °С); *б* – полученный «холодной» экструзией

Точность пористых моделей, как правило, на 1–2 качества выше, чем традиционных. При получении керамических оболочковых форм по пористым моделям повышается стойкость первых к образованию трещин. Трещины в керамической форме появляются при удалении из нее традиционного модельного блока вследствие расширения модельной массы при ее нагреве. Модельная масса пористых выплавляемых моделей при удалении из керамической оболочковой формы в результате нагрева расширяется в пределах объема «своих» пор и не пропитывает оболочковую форму. Отсутствие модельной массы в порах оболочковой формы предотвращает ее растрескивание при прокалке перед заливкой металлическим расплавом.

Важным при формировании пористой выплавляемой модели является отсутствие размерно-геометрических дефектов, связанных с упругим откликом материала модели. Упругий отклик возникает в объеме прессовки либо в локальных ее участках вследствие переуплотнения. Начальная (насыпная) плотность порошка модельной массы составляет 0,34–0,35 г/см<sup>3</sup>. При уплотнении порошка модельной массы объем материала прессовки в ходе его деформирования сокращается более чем в два раза, а плотность такой прессовки составляет 0,80–0,84 г/см<sup>3</sup>. Упругий отклик появляется вследствие разгрузки напряжений, накапливающихся в материале при его деформировании [3], и приводит к увеличению объема прессовки, понижая ее плотность. Величина упругого отклика зависит от ряда параметров: температуры,

формы и фракции компонентов деформируемого материала, плотности прессовки. Экспериментально установлено, что упругий отклик прессовок из порошков модельных композиций хлопьевидной формы фракции 1,0 мм составляет 0,49–0,42 % при получении моделей с плотностью 6–12 % от плотности выплавляемой модели, полученной свободной заливкой модельного материала в пресс-форму [4]. Величина упругого отклика прессовок снижается с увеличением пористости. По завершении релаксации материала такие характеристики конечной прессовки, как плотность, прочность и др., несколько отличаются от расчетных значений. В ряде случаев для получения прессовок с повышенной прочностью и пористостью для изготовления прессовок применяют комбинированные составы на основе порошков воскообразных и растворимых компонентов [5]. При использовании таких моделей в технологический процесс вносятся коррективы: перед выплавлением модельной массы из керамической оболочки последнюю погружают в воду, которая, проникая через поры оболочковой формы, взаимодействует с растворимыми компонентами модели, увеличивая их пористость. Такие модели называют пористыми удаляемыми. При отмеченных недостатках такой способ позволяет получать выплавляемые модели с высокими значениями размерной и геометрической точности.

Указанные преимущества и недостатки прессованных пористых моделей из полимерных или комбинированных дисперсных материалов определяют необходимость изучения и совершенствования процесса их получения. Учет напряженно-деформированного состояния и, как следствие, упругого отклика материала прессовок необходим при проектировании оснастки для их получения [6]. В настоящее время напряженно-деформированное состояние прессовки из конкретного материала с учетом фракционности и формы его компонентов, заданных параметров деформирования определяется экспериментально. Изучение возможности прогнозирования напряженно-деформированного состояния прессовок из полимерных модельных композиций математическими расчетами с использованием метода конечных элементов представляется актуальным.

Целью настоящей работы является определение вариантов прогнозирования напряженно-деформированного состояния прессовок из порошков полимерных модельных композиций на основе расчета ме-

тодом конечных элементов и натурального эксперимента с последующим сравнением полученных результатов.

При достижении цели решались следующие задачи:

– определение констант материала порошкового тела, необходимых для виртуального получения характеристик напряженно-деформированного состояния прессовок;

– сравнение графических зависимостей нагрузки (кН) от деформации (%), полученных в ходе математических расчетов и натуральных исследований при одноосном вертикальном формировании прессовок из порошкового тела;

– на основе экспериментальных данных определение возможности использования метода конечных элементов для составления прогноза напряженно-деформированного состояния прессовки из полимерных порошковых материалов.

Уплотнение порошковых материалов характеризуется тремя основными стадиями: разрушение «арок» в ходе интенсивного уплотнения порошка – структурная деформация порошкового тела; максимально плотная упаковка частиц порошка, сопротивляющихся сжатию, при котором давление прессования растет, плотность не увеличивается, а пластическая деформация в приконтактной зоне носит локальный характер; давление прессования превышает сопротивление сжатию частиц порошка, пластическая деформация охватывает весь объем каждой частицы, смещение межчастичных контактов прекращается [7].

Экспериментально установлено, что при прессовании порошков происходит взаимное наложение стадий порошкового тела, протекающих одновременно. Преимущественное значение для получения прессовок с однородным распределением плотности имеет перемещение частиц на первой и второй стадиях прессования. Для получения равномерного упругого отклика материала прессовки важным является достижение изотропности свойств порошкового тела во всем его объеме на момент прессования, соответствующий началу пластической деформации. На равномерность распределения свойств в объеме прессовки из однородного материала влияют также следующие условия: форма и фракция компонентов смеси, геометрические параметры получаемой прессовки (соразмерность высоты, ширины и толщины), скорость прессования [8]. При равномерном расположении компонентов в гетерогенной смеси очаги деформации полимерного компонента

локализуются в окрестности более плотного компонента смеси, что позволит получить равномерный упругий отклик сформированной системы после извлечения из пресс-формы.

В ходе исследований процесса уплотнения модельного материала осуществлялись натурные эксперименты и математические расчеты, по завершении которых проводили сравнение полученных результатов. Основная задача указанных экспериментов – определить адекватность данных, полученных в ходе математического моделирования уплотнения материала, напряженно-деформированного состояния порошковых одно- и двухкомпонентных тел, подвергающихся формоизменению.

Для моделирования процесса формоизменения материала использовали метод конечных элементов, позволяющий решить совместную механическую и температурную задачу, имеющий адаптивную автоматизированную систему генерации сетки конечных элементов с учетом упругих и вязкопластических свойств материала.

В ходе предыдущих исследований установлено наименьшее различие значений продольного и поперечного упругого отклика при прессовании порошкового тела, состоящего из равнофракционных элементов шаровидной формы [7–10].

Расчет процесса уплотнения порошкового тела из шаровидных элементов представляется затруднительным. В ходе расчета напряженно-деформированного состояния двух и более вертикально одноосно расположенных шаров появляются ошибки триангуляции при построении пространственной сетки объектов моделирования.

Для корректного расчета формоизменения порошкового тела требуется определить некоторые константы и параметры. Для материала уплотняемого порошкового тела определяем: плотность, кривую сопротивления деформации, зависящую от таких параметров, как деформация, скорость деформации, температура. Для материала пресс-формы определяем: кривую сопротивления деформации, плотность, модуль Юнга, который является важной физической величиной, характеризующей свойства материала сопротивляться сжатию при упругой деформации. В качестве материала – имитатора растворимых компонентов в эксперименте выбрана сталь 45. Свойства стали 45 соответствуют ГОСТ 1050–88 (модуль Юнга 210 ГПа, плотность 7810 кг/м<sup>3</sup>) (ГОСТ 1050–88. Прокат сортовой, калиброванный, со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали).

Требуемые технологические и эксплуатационные свойства выплавляемых моделей в производстве достигаются использованием преимущественно многокомпонентных модельных материалов, например ПС 50/50, в котором содержание парафина и стеарина одинаково. С целью минимизации погрешности эксперимента в качестве порошкового тела использовали полимерный однокомпонентный материал на основе парафина по ГОСТ 23683–89 «Парафины нефтяные твердые. Технические условия». Поскольку нефтяной парафин является относительно легкоплавким материалом, среди предлагаемых ГОСТ 23683–89 выбираем парафин марки Т1. К свойствам, определяющим параметры процесса уплотнения этого материала, отнесем плотность материала, полученного свободной заливкой  $0,86 \text{ г/см}^3$  с учетом распределенной пористости; температуру плавления, определенную при помощи прибора дифференциально-термического анализа Shimadzu DTG-60Н  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  (ГОСТ 23683–89 регламентирует температуру плавления для парафина марки Т1  $52\text{--}58 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Поскольку выбранный полимерный материал не является конструкторным, то стандартное значение модуля Юнга для парафина в известных источниках обнаружить не представляется возможным. Для вычисления модуля Юнга для парафина марки Т1 были изготовлены цилиндрические образцы с разными отношениями диаметра к высоте (1:1; 1:1,5; 1:2), которые были разрушены на тестовой машине AG-X plus Shimadzu.

После проведения испытания полученные образцы были проверены по следующему условию:

$$\varepsilon_c^* \leq 0,4 \frac{D^2}{h^2}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_c^*$  – максимальная номинальная относительная деформация при сжатии, которая достигается при испытании, безразмерная величина;  $D$  – диаметр цилиндра, мм;  $h$  – высота образца, измеренная параллельно направлению сжимающей силы, мм [11].

Экспериментальные данные, соответствующие представленной выше методике расчета, помещены в табл. 1. Здесь приведены результаты по ряду образцов сопоставимых начальных высот по трем группам.



Таблица 1

Определение соответствия образцов из парафина марки П1 условию 1

Группа	Номер образца	Высота $h$ , мм	Высота $\Delta g$ , на которой произошло разрушение, мм	Сила, при которой произошло разрушение, $F$ , Н	Относительная деформация $\epsilon_c^*$	$\epsilon_{ср}^*$	Средняя высота для серии $\Delta g_{ср}$ , мм	Диаметр $D$ , мм	$S = \pi D^2/4$ , мм <sup>2</sup>	$0,4 \frac{D^2}{h^2}$
1	1	26,35	0,635	1203,06	0,0240	0,026	0,702	27,5	593,9	0,436
	2	27,2	0,865	1086,79	0,0318			27,6	598,3	0,412
	3	27,1	0,605	1380,72	0,0223			27,1	576,8	0,4
2	4	40	0,884	1379,81	0,0221	0,022	0,886	27	572,6	0,182
	5	40,35	0,888	1301,05	0,022			27,2	581,1	0,182
	6	40,6	0,886	1410,52	0,0218			27,2	581,1	0,18
3	7	52,8	0,835	1181,44	0,0158	0,015	0,803	27,3	585,3	0,107
	8	52,45	0,789	1304,27	0,015			27,3	585,3	0,108
	9	53,2	0,786	1359,11	0,0148			27,3	585,3	0,105

Из табл. 1 видно, что условию (1) удовлетворяют все элементы выборки. Однако для образцов второй группы высоты  $\Delta g$  (мм), на которых происходило разрушение, можно считать одинаковыми. Образцам этой группы, в которой соотношение диаметра и высоты  $\approx 1:1,5$ , также свойственна стабильность в вычисленной относительной деформации. В связи с этим для расчета модуля Юнга решено использовать средние данные по группе 2.

Модуль Юнга рассчитаем по следующей формуле:

$$E = \frac{Fh}{S\Delta h}, \quad (2)$$

где  $F$  – нормальная составляющая силы, Н;  $S$  – площадь поверхности, по которой распределено действие силы, мм<sup>2</sup>;  $h$  – высота деформируемого стержня, мм;  $\Delta h$  – модуль изменения высоты прессовки в результате упругой деформации, мм.

Модуль Юнга по формуле (2) определяем как среднее для всех экспериментальных значений напряжений, характерных для области упругой деформации. Результат расчета приведен в табл. 5. Приведенное в таблице среднее значение  $E$  для парафина марки Т1 используем в расчетах, в ходе которых получаем зависимости нагрузки (Н) от перемещения (мм).

Таблица 2

Определение среднего значения модуля Юнга для парафина марки Т1

Номер образца группы 2	Среднее значение силы в области упругой деформации $F_i$ , Н	$\Delta h_{\text{ср}}$ , мм	$E_i = \frac{F_i h}{S \Delta h}$ , ГПа	Среднее значение $E$ , ГПа
4	552,92	0,46	84,36	81,91
5	398,16	0,35	80,25	
6	583,43	0,50	81,13	

Моделировать формоизменение порошкового тела, состоящего из сферических объектов, затруднительно. С целью предотвращения ошибок триангуляции форма моделируемых объектов была изменена на цилиндрическую.

В связи с этим для проведения эксперимента выбраны элементы цилиндрической формы ( $\varnothing = 10$  мм,  $h = 10$  мм) из различных материалов: полимерный – парафин марки Т1 и имитатор растворимого компонента гетерогенной смеси – стальные цилиндры. В реальной гетерогенной смеси, предназначенной для получения пористой удаляемой модели, значения плотности и поверхностной твердости растворимых компонентов в несколько раз превышают значения этих характеристик у воскообразных компонентов. В связи с этим считаем, что стальные цилиндры, используемые в эксперименте, не деформируются и служат для передачи энергии прессования полимерным компонентам смеси. С целью визуализации процесса деформирования порошкового тела производим в пресс-форме с прозрачной стенкой. Пресс-форма достаточно жесткая, чтобы обеспечить сопротивление нагрузке, возникающей на этапе пластической деформации всего объема порошкового тела. Прессование вертикальное, одностороннее, как показано на рис. 2.

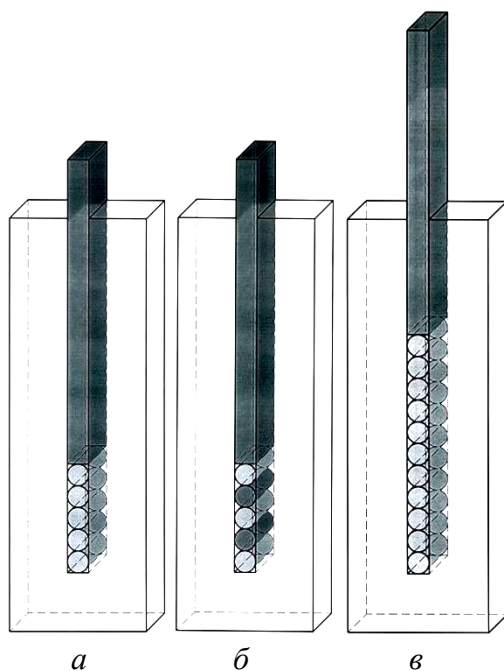


Рис. 2. Варианты размещения элементов в пресс-форме: *а* – 5 цилиндров из парафина Т1; *б* – поочередное размещение парафиновых (светлых) и стальных (темных) цилиндров; *в* – размещение 11 парафиновых цилиндров, имитирующих получение протяженной прессовки

В результате математического расчета и натурального эксперимента построены зависимости нагрузки (кН) от деформации (%), которые возникают в порошковом теле в ходе перемещения пуансона пресс-формы. Начальная стадия эксперимента имитирует достижение пуансоном пресс-формы точки, при которой начинается пластическая деформация всего объема уплотняемого тела. Важным представляется сравнение данных, полученных в ходе математического расчета и натурального исследования, характерных для напряженно-деформированного состояния третьей стадии уплотнения порошкового тела. Деформации при таком нагружении необратимы.

Пластическую деформацию порошкового тела, состоящего из дисперсного полимерного материала, возникающую при его уплотнении, можно считать большой. При уплотнении такого тела на стадии  $\varepsilon \geq 20\%$ , когда завершается перекомпоновка частиц материала, отмеченная появлением локальных зон их спекания, и начинается деформация всего объема уплотненного материала, пластическую деформацию можно считать «развитой», так как такой процесс характеризуется множественным скольжением<sup>1</sup>. На этой стадии тело перестает быть порошковым и деформация некоторое время происходит без значительного роста напряжений.

На рис. 3 представлены зависимости деформации (%) от сопротивления уплотняемой среды нагрузке (кН), которая возникает во время перемещения пуансона пресс-формы при одностороннем прессовании изотропных и гетерогенных материалов. При реальном деформировании порошкового тела на тестовой машине Shimadzu AGX250 была задана скорость перемещения пресс-пуансона, равная 1 мм/с. Представленные на рис. 3 иллюстрации соответствуют значениям деформации  $\varepsilon \leq 40\%$ . При этом объемная плотность  $\rho_{об}$  воскообразных компонентов смеси составляет 1,3–1,4 насыпной плотности  $\rho_{нас}$ . Насыпная плотность рассматриваемой в эксперименте фракции воскообразного материала  $\rho_{нас} \sim 0,6 \text{ кг/м}^3$ . Дальнейшее прессование характеризуется интенсивным увеличением сопротивлению прессования при относительно небольших перемещениях пуансона пресс-формы во всех рассматриваемых случаях.

---

<sup>1</sup> ГОСТ 4651–2014 (ISO 604:2002). Пластмассы. Метод испытания на сжатие. Пункт 6.1.1.

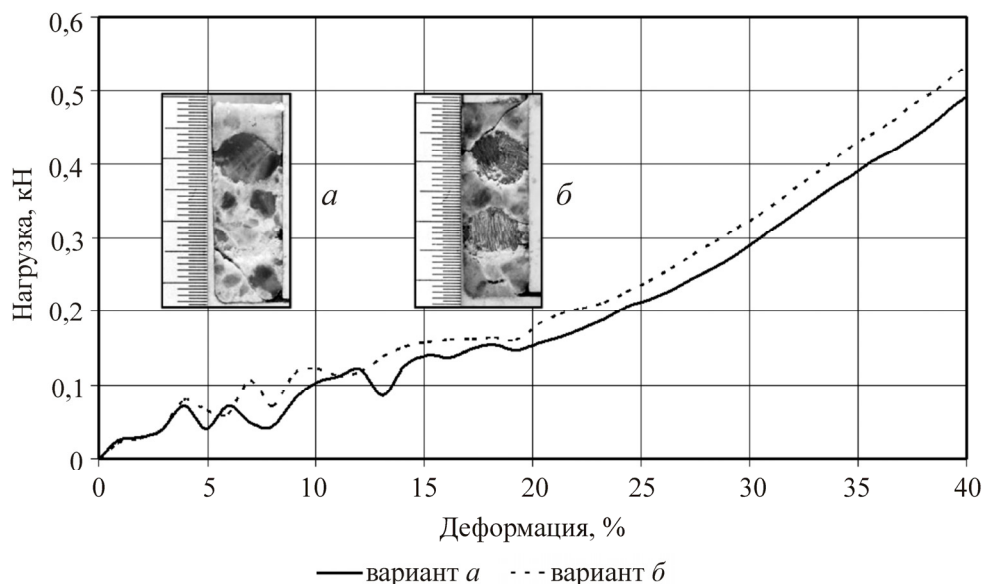


Рис. 3. Зависимости нагрузки (кН) от деформации (%) при реальном уплотнении цилиндрических элементов на установке Shimadzu AGX250: *а* – 5 элементов из парафина Т1; *б* – поочередное размещение парафиновых и стальных элементов

Из рис. 3 видно, что в диапазоне значений деформации  $0\% \leq \varepsilon \leq 40\%$  существенных различий по величине нагрузки при уплотнении рассматриваемых систем не наблюдается. На рис. 3 представлен внешний вид уплотняемых систем при  $\varepsilon \approx 20\%$ . Видно, что деформация, разрушение и уплотнение части полимерных элементов происходят одинаково. Для варианта «б» размещения элементов в пресс-форме после значений деформации  $\varepsilon \leq 40\%$  величина нагрузки существенно выше, чем для варианта «а». Рост деформации для варианта «б» незначителен.

Однако при сравнении результатов математического расчета с экспериментальными данными различия в величинах нагрузки и деформации, представленные на рис. 4, становятся более заметными. Так, рост деформации для вариантов «а» и «б» размещения элементов в пресс-форме завершается по достижении  $\varepsilon \approx 26,5\%$  и  $\varepsilon \approx 37,2\%$  соответственно. При анализе зависимостей, представленных на рис. 3, следует учесть, что в ходе математического расчета уплотняемая среда воспринимается как сплошной материал с однородными свойствами,

поэтому расчет для варианта «б» проведен только для деформации нижнего элемента. На рис. 4 визуально отражены этапы виртуального уплотнения элементов, полученные в ходе математического расчета, по вариантам размещения «а» и «б», характерные для начала (слева) и завершения (справа) процесса деформирования.

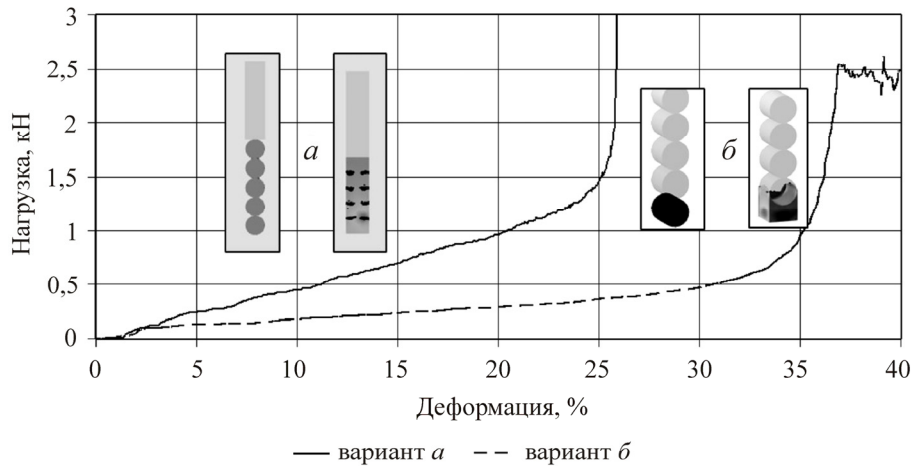


Рис. 4. Расчетные зависимости нагрузки (кН) от деформации (%) при виртуальном эксперименте по уплотнению цилиндрических элементов для «а» и «б» вариантов размещения элементов в пресс-форме

Сравнительные зависимости нагрузки от деформации, полученных в ходе расчета и натурального эксперимента для вариантов «а» и «б» размещения элементов, представлены на рис. 5, а, б соответственно. Из рис. 5, а видно, что различия в значениях нагрузки и деформации расчетного и натурального экспериментов значительны уже на начальном этапе уплотнения, в то время как при уплотнении по варианту «б» (см. рис. 5, б) существенные отличия появляются только на этапе, соответствующем  $\epsilon \geq 32\%$ .

Зависимости нагрузки от деформации при одноосном деформировании длинномерного порошкового тела, состоящего из цилиндрических полимерных элементов, по варианту «в» размещения в пресс-форме представлены на рис. 6.

На графическом поле рис. 6 представлены начальные и соответствующие  $0\% \leq \epsilon \leq 27\%$  стадии расчетного и натурального деформирования полимерных элементов. Видно, что рост значений деформации

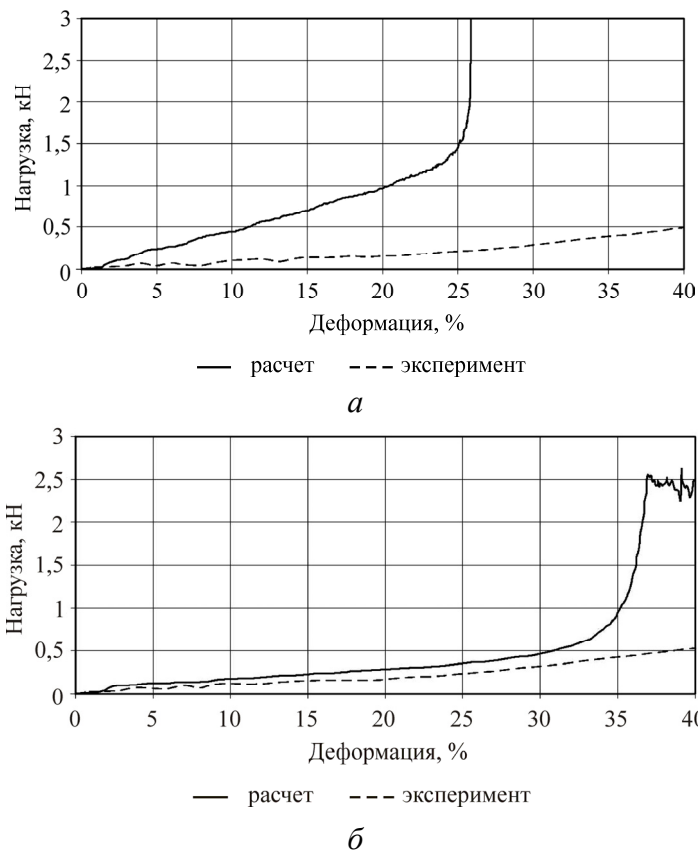


Рис. 5. Зависимости нагрузки (кН) от деформации (%) при расчетном и натурном экспериментах по уплотнению цилиндрических элементов для вариантов «а» и «б» размещения элементов в пресс-форме

при виртуальном эксперименте прекращается при  $\epsilon \approx 27\%$ , в то время как реальная деформация продолжается до  $\epsilon \approx 40\%$ . Из анализа рис. 6 очевидно, что различия в результатах расчетного и натурального экспериментов значительны уже на этапе, соответствующем деформации  $\epsilon \geq 7\%$ , что объясняется, предположительно, отсутствием возможности учета пор в элементах уплотняемого тела при расчетном эксперименте, а также наличием зазоров между последними и стенками пресс-формы в натурном эксперименте.

При одноосном уплотнении порошковых тел с отношением длины прессовки к ширине основания, не превышающим 5, установлено:

– в ходе реального эксперимента различий по нагрузке в диапазоне значений деформации  $0\% \leq \epsilon \leq 40\%$  не наблюдается. Это спра-

ведливо для прессовок, состоящих как из однородных элементов, так и из элементов различной плотности;

– совпадение результатов расчета и натурального эксперимента при оценке напряженно-деформированного состояния прессовок достигается лишь в ряде случаев.

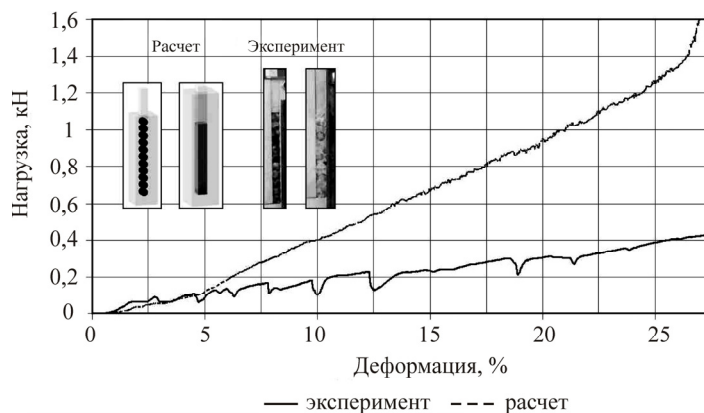


Рис. 6. Зависимости нагрузки (кН) от деформации (%) при расчетном и натурном экспериментах по уплотнению цилиндрических элементов для варианта «в» размещения элементов в пресс-форме

Использование метода конечных элементов для моделирования процессов обработки материалов давлением с целью прогнозирования напряженно-деформированного состояния прессовок из порошков полимерных модельных композиций возможно:

– для описания этапов одноосного уплотнения длинномерных порошковых тел с отношением длины прессовки к ширине основания большим 10, соответствующих малым деформациям;

– для этапов одноосного уплотнения порошковых тел с отношением длины прессовки к ширине основания равным 1 в интервале значений  $0 \% \leq \varepsilon \leq 30 \%$ .

*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)».*



### Список литературы

1. Литье по выплавляемым моделям / под общ. ред. В.А. Озерова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1994. – 448 с.
2. Определение параметров логарифмического уравнения прессования для описания процесса одноосного уплотнения порошкового тела из полимерного материала / С.Г. Жилин, О.Н. Комаров, Д.А. Потянихин, А.А. Соснин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2016. – Т. 18, № 4. – С. 48–59.
3. Буренин А.А. Упругий отклик среды при развитии, остановке и повторном вязкопластическом течении, включая мгновенную разгрузку // Фундаментальные проблемы теоретической и прикладной механики. Вестник Нижегород. ун-та им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4(5). – С. 2043–2044.
4. Получение отливок повышенной размерной точности по комбинированным литейным моделям из алюмотермитных и воскообразных смесей / С.Г. Жилин, О.Н. Комаров, А.А. Соснин, В.В. Предеин // Заготовительные производства в машиностроении. – 2016. – № 11. – С. 6–11.
5. Жилин С.Г. Управление структурой и свойствами пористых комбинированных удаляемых моделей: дис. ... канд. техн. наук. – Комсомольск-на-Амуре, 2002. – 218 с.
6. Жилин С.Г., Комаров О.Н., Соснин А.А. Технология сокращения упругого отклика прессованных выплавляемых моделей для получения отливок повышенной размерной точности // Будущее машиностроения России: сб. докл. девятой всерос. конф. молодых ученых и специалистов / Союз машиностроителей России; МГТУ им. Н.Э. Баумана. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – С. 127–129.
7. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1986. – 224 с.
8. Особенности формирования пористой структуры прессовок из полимерного дисперсного материала / С.Г. Жилин, О.Н. Комаров, А.А. Соснин, Д.А. Потянихин // Ученые записки КнАГТУ. – 2016. – № IV(28). – С. 26–338.
9. Особенности формирования полимерного слоя на поверхности модельного блока для повышения точности стальных отливок / С.Г. Жилин, О.Н. Комаров, В.В. Предеин, Д.А. Потянихин, А.В. Попов // Будущее машиностроения России: сб. докл. девятой всерос. конф. молодых ученых и специалистов / Союз машиностроителей России; МГТУ им. Н.Э. Баумана. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – С. 130–132.
10. Особенности формирования пористой структуры и разрушения прессовок из полимерных дисперсных материалов / С.Г. Жилин, О.Н. Комаров, А.А. Соснин, А.В. Попов // Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций: материалы X Междунар. конф. Екатеринбург, 16–20 мая 2016 г. – Екатеринбург: Изд-во ИМАШ УрО РАН, 2016. – С. 42.
11. Химическая энциклопедия / под ред. И.Л. Кнунянц [и др.]. – М.: Сов. энцикл., 1992. – Т. 3. – С. 207, 446.
14. Медведев Я.И., Валисовский И.В. Технологические испытания формовочных материалов. – М.: Машиностроение, 1973. – 312 с.

## References

1. Lit'e po vyplavliaemym modeliam [Investment casting]. Ed. V.A. Ozerova. Moscow: Mashinostroenie, 1994. 448 p.
2. Zhilin S.G., Komarov O.N., Potianikhin D.A., Sosnin A.A. Opredelenie parametrov logarifmicheskogo uravneniia pressovaniia dlia opisaniia protsessa odnoosnogo uplotneniia poroshkovogo tela iz polimernogo materiala [Determination of parameters of the logarithmic equation of pressing for the description of process of monoaxial consolidation powder bodies of polymeric material]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2016. Vol. 18, no. 4, 48–59 pp.
3. Burenin A.A. Uprugii otklik sredey pri razviti, ostanovke i povtornom viazkoplasticheskom techenii, vkluchaia mgnovennuiu razgruzku [Elastic response of the environment at development, a stop and a repeated visco-plastic current, including instant unloading]. *Fundamental'nye problemy teoreticheskoi i prikladnoi mekhaniki. Vestnik Nizhegorodskogo universiteta imeni N.I. Lobachevskogo*, 2011, no. 4(5), 2043–2044 pp.
4. Zhilin S.G., Komarov O.N., Sosnin A.A., Predein V.V. Poluchenie otlivok povyshennoi razmernoi tochnosti po kombinirovannym liteinym modeliam iz aliumotermitykh i voskoobraznykh smesei [Receiving castings of the increased dimensional accuracy on the combined foundry models from the aluminum and waxy mixes]. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*, 2016, no. 11, 6–11 pp.
5. Zhilin S.G. Upravlenie strukturoi i svoystvami poristykh kombinirovannykh udaliayemykh modelei [Management of structure and properties of the porous combined deleted models]. Ph. D. thesis. Komsomol'sk-na-Amure, 2002, 218 p.
6. Zhilin S.G., Komarov O.N., Sosnin A.A. Tekhnologiya sokrashcheniia uprugogo otklika pressovannykh vyplavliaemykh modelei dlia polucheniia otlivok povyshennoi razmernoi tochnosti [Technology of reduction of an elastic response of the pressed melted models for receiving castings of the increased dimensional accuracy]. *Budushchee mashino-stroeniia Rossii: sbornik dokladov. deviatoi vserossiiskoi konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov. Soiuz mashinostroitelei Rossii; Moskovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni N.E. Baumana. Moscow: Izdatel'stvo moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni N.E. Baumana*, 2016, 127–129 pp.
7. Rybin V.V. Bol'shie plasticheskie deformatsii i razrushenie metallov [Big plastic deformations and destruction of metals]. Moscow: Metallurgiya, 1986, 224 p.
8. Zhilin S.G., Komarov O.N., Sosnin A.A., Potianikhin D.A. Osobennosti formirovaniia poristoi struktury pressovok iz polimernogo dispersnogo materiala [Features of formation of porous structure of pressings from polymeric disperse material]. *Uchenye zapiski Komsomol'skii-na-Amure gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet*, 2016, no. IV(28), 26–338 pp.
9. Zhilin S.G., Komarov O.N., Predein V.V., Potianikhin D.A., Popov A.V. Osobennosti formirovaniia polimernogo sloia na poverkhnosti model'nogo bloka dlia povysheniia tochnosti stal'nykh otlivok [Features of formation of a polymeric layer on the surface of the model block for increase in accuracy of steel castings]. *Budushchee mashinostroeniia Rossii: sbornik dokladov deviatoi vserossiiskoi konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov. Soiuz mashinostroitelei Rossii; Moskovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii*

universitet imeni. N.E. Bauman. M.: Izd-vo MGTU imeni N.E. Bauman, 2016, 130–132 pp.

10. Zhilin S.G., Komarov O.N., Sosnin A.A., Popov A.V. Osobennosti formirovaniia poristoi struktury i razrusheniia pressovok iz polimernykh dispersnykh materialov [Features of formation of porous structure and destruction of pressings from polymeric disperse materials]. *Mekhanika, resurs i diagnostika materialov i konstruksii: materialy X Mezhdunarodnoi konferentsii*. Ekaterinburg, 16–20 maia, 2016. Ekaterinburg: Izdatel'stvo institut mashinovedeniia uralskoi akademii nauk, 2016, 42 p.

11. Khimicheskaia entsiklopediia [Chemical encyclopedia]. Ed. I.L. Knunians. Moscow: Sovetskaia entsiklopediia, 1992. Vol. 3, 207, 446 pp.

12. Medvedev Ia.I., Valisovskii I.V. Tekhnologicheskie ispytaniia formovochnykh materialov [Technological tests of forming materials]. Moscow: Mashinostroenie, 1973, 312 p.

Получено 28.03.2017

### Об авторах

**Жилин Сергей Геннадьевич** (Комсомольск-на-Амуре, Россия) – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией химических и фазовых превращений в материалах Института машиностроения и металлургии Дальневосточного отделения РАН; e-mail: sergeyzhilin1@rambler.ru.

**Комаров Олег Николаевич** (Комсомольск-на-Амуре, Россия) – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории химических и фазовых превращений в материалах Института машиностроения и металлургии Дальневосточного отделения РАН; e-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru.

**Соснин Александр Александрович** (Комсомольск-на-Амуре, Россия) – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории проблем металлотехнологий Института машиностроения и металлургии Дальневосточного отделения РАН; e-mail: sosnin@imim.ru.

### About the authors

**Sergey G. Zhilin** (Komsomolsk-na-Amure, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Head of Laboratory of Chemical and Phase Transformations in Materials, Institute of Machinery and Metallurgy, Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences; e-mail: sergeyzhilin1@rambler.ru.

**Oleg N. Komarov** (Komsomolsk-na-Amure, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher, Laboratory of Chemical and Phase Transformations in Materials, Institute of Machinery and Metallurgy, Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences; e-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru.

**Aleksandr A. Sosnin** (Komsomolsk-na-Amure, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Researcher, Laboratory of Problem of Technology of Metals, Institute of Machinery and Metallurgy, Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences; e-mail: sosnin@imim.ru.