

С. Г. Жилин, И. Г. Сапченко, О. Н. Комаров

ФОРМИРОВАНИЕ ПРЕССОВОК ИЗ ПОРОШКОВ ПОЛИМЕРНЫХ ИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ

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

Аннотация. При формировании прессовок из полимерных дисперсных материалов, применяемых в специальных видах литья для получения выплавляемых моделей, существенным недостатком является упругий отклик материала. Определенные сложности в учете этого эффекта возникают вследствие объемной анизотропии свойств получаемых прессовок и малой точностью прогноза их конечных размеров. В работе представлены данные, полученные в ходе эксперимента. Рассмотрены варианты размещения элементов в пресс-матрице, при которых может быть получена прессовка. Изменением скорости формирования прессовок достигается снижение их анизотропии, что позволяет прогнозировать конечные размеры формируемого изделия, учет которых важен при проектировании пресс-оснастки.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, прессование, пористость, гетерогенные материалы, размерно-геометрическая точность, упругий отклик.

УДК: 621.74.045: 53.09

Из ряда технологий, направленных на получение точных литых заготовок, литье по выплавляемым моделям представляется наиболее предпочтительным. Такой метод позволяет получать литые заготовки различной пространственной конфигурации, а в ряде случаев, – с поверхностями, не требующими механической обработки [1], [2]. В ходе реализации такого метода получения заготовок традиционно проблематичным

© Жилин С. Г., Сапченко И. Г., Комаров О. Н., 2016

Жилин Сергей Геннадьевич

e-mail: zhilin@imim.ru, кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией, Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия.

Сапченко Игорь Георгиевич

e-mail: mail@imim.ru, доктор технических наук, доцент, заместитель директора по научным вопросам, Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия.

Комаров Олег Николаевич

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

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта ДВО РАН (проект 15-I-4-018).

Поступила 28.01.2016

является этап изготовления выплавляемой модели, включающий запрессовку модельной массы в жидком или пастообразном состоянии в пресс-форму. Остывшая модельная масса должна формировать модель отливки, однако в силу различных факторов последняя, как правило, нуждается в дополнительной обработке, связанной с устранением усадочных дефектов и неровностей поверхности. Одним из основных направлений повышения размерной и геометрической точности в литье по выплавляемым моделям является получение отливок по пористым выплавляемым моделям [3]. Формирование пористых выплавляемых моделей “холодным” прессованием дисперсного модельного материала решает проблему усадки материала, а размерные параметры такой выплавляемой модели регламентированы пресс-формой [4], [5].

Сущность процесса прессования заключается в деформировании компонентов порошкового полимерного материала, при котором происходит уменьшение первоначального объема и формирование прессовки заданной формы, размеров и свойств. Объем порошкового материала при прессовании изменяется в результате смещения частиц, заполняющих пустоты между ними, и их деформированием [6].

При реализации разработанного способа модели имеют рассредоточенную мелкодисперсную открытую пористость по всему объему в пределах 3–20 %. Процесс порообразования саморегулирующийся и модели имеют меньшую пористость в тонких частях. Заложенный принцип изготовления пористых выплавляемых моделей позволяет распределить внутренние напряжения по всему объему, что обуславливает их инертность к перепадам температур, имеющим место при формировании керамической оболочки. Плотность прессовки зависит от прикладываемого давления. Процесс уплотнения характеризуется повторяющимися явлениями. Пластические свойства порошков модельного материала характеризуются уплотняемостью, формуемостью, вязкостью, сыпучестью и текучестью [7]. Провести существенные различия между этими характеристиками не всегда возможно ввиду их взаимосвязанности. Эти параметры существенно влияют на воспроизводимость смесью модельного порошка конфигурации модели, влияя на ее размерно-геометрические характеристики.

При получении выплавляемой модели с развитой пространственной поверхностью прессованием порошка модельной массы возникают проблемы с равномерностью распределения свойств в объеме прессовки, а именно сложности прогнозирования плотности в различных участках выплавляемой модели. Модельный материал пластичен, а в диспергированном виде он в процессе прессования течет. Текучесть модельного материала, как и в случае с жидкостью, зависит от скорости ее движения, давления и плотности. Для дисперсной сыпучей среды, состоящей из полимерных элементов, определить такие характеристики текучести численными методами не представляется возможным. В ходе одностороннего деформирования (прессования) такой сыпучей среды текучесть зависит не только от состояния этих характеристик для каждого положения пресс-пуансона, но и от таких свойств среды, как наличие “арок”, хаотично складывающихся из элементов сыпучего материала, его температуры, трения материала о внутреннюю поверхность пресс-матрицы и т. д. В силу неоднородности свойств в объеме подвергающейся прессованию системы локальное воздействие указанных выше свойств растет с увеличением деформации системы.

Текучесть однородной смеси согласно определения Г. М. Орлова [8] – это способность смеси перемещаться (перетекать) в направлении, перпендикулярном сжимающим напряжениям, т. е. это способность элементов предварительно уплотненной смеси к взаимным перемещениям без разрыва связей под действием сил, превышающих

сопротивление сдвигу. Таким образом, если порошковый материал не уплотнен до заданной плотности, то отсутствует его текучесть.

Согласно классической теории механики грунтов [9] пластичность определяется как напряженное состояние, при котором материал способен изменять форму без изменения объема и нарушения сплошности, т. е. сопротивление сдвигу материала изучается в условиях предельного напряженного состояния, соответствующего незатухающим скольжениям (сдвигам) одной части слоя материала над другой. Действующие на материал критические нагрузки при таком состоянии вызывают последовательные сдвиги, приводящие к необратимым деформациям.

В случае высокой пластичности [7] модельного материала изделие формируется при относительно невысоком давлении, а полученные прессовки легко деформируются даже под действием собственной массы. Модельные материалы с низкой пластичностью требуют повышенного давления, прессовки обладают высокой стойкостью против необратимых деформаций, а требования к жесткости и прочности конструкций пресс-форм значительно возрастают.

Технологически важным при получении пористой выплавляемой модели является отсутствие размерно-геометрических дефектов, связанных с упругим последствием материала модели, возникающим вследствие его переуплотнения как во всем объеме прессовки, так и в локальных участках. Для получения прессовок простых сечений (когда размеры сторон сопоставимы) достаточным, в большинстве случаев, является уплотнение модельного материала до плотности на 10–12% меньшей, чем плотность этого материала в литом состоянии. Пористые выплавляемые модели при такой плотности сохраняют требуемые прочностные характеристики и не оказывают расширяющего воздействия на керамическую форму при выплавлении из последней модельной массы [10]. При получении всего тела прессовки или отдельных участков с переуплотнением возникают напряжения, приводящие к появлению упругого последствия материала и снижению размерной и геометрической точности. Экспериментально установлено, что при формировании прессовки из дисперсного полимерного материала наибольшая плотность достигается в зонах, расположенных непосредственно под пресс-пуансоном, а при получении сложной пространственно ориентированной прессовки требуемая плотность во всех ее участках не достигается. В литейном производстве при деформировании формовочных смесей, особенно высокопрочных, импульсным уплотнением упругий возврат и обратная упругая деформация отсутствуют [11]. Однако влияние скорости уплотнения полимерных модельных материалов на появление упругого последствия пористых выплавляемых моделей не установлено. Таким образом, поиск метода получения пористой выплавляемой модели с равномерным распределением напряжений в объеме представляется актуальным.

Целью работы является изучение механизма распределения свойств в объеме прессовки в процессе односторонней деформации дисперсного полимерного материала. В рамках поставленной цели решаются следующие задачи: исследование влияния начальной упаковки материала в пресс-матрице на его сопротивление деформированию при увеличении нагрузки; определение оптимальной скорости прессования гомогенного полимерного материала.

В практике получения пористых выплавляемых моделей прессованием применяются модельные материалы из различных полимерных композиций с формой порошков в виде ломаных частиц различной формы, получаемых в ходе экструзии модельного материала с последующим рассевом по фракциям [12]. Примечательно, что на стадии

загрузки фракции модельного материала в пресс-матрицу заполнение поднутрений последней регламентировано углом естественного откоса модельного материала, который для каждой фракции определяется не только размером, но и формой компонентов [12]. Снижение влияния упругого последствия прессовок на их размерно-геометрическую точность возможно при использовании гомогенных модельных материалов, состоящих из воскообразных полимерных компонентов шаровидной формы [13]. Форма компонентов модельного материала обуславливается их потенциалом к самопроизвольному равномерному распределению в полости пресс-формы как перед началом формовки, так и по завершении последней. Использование шаровидной формы компонентов смеси одной фракции позволяет упразднить учет фактора неоднородности формы материала при получении прессовки.

Идеализированный процесс уплотнения порошковых материалов выражается зависимостью плотности прессовки от давления прессования и характеризуется 3-мя основными стадиями [4], [14]: структурной деформацией порошкового тела; максимально плотной упаковкой частиц порошка, сопротивляющихся сжатию; пластической деформацией частиц. На практике при прессовании порошков происходит взаимное наложение стадий порошкового тела, протекающих одновременно. Процесс распределения компонентов смеси завершается, как правило, на второй стадии прессования и определяет картину напряжений, возникающих в прессовке по завершении процесса деформирования смеси. Таким образом, при одностороннем прессовании практический интерес вызывает графическая зависимость силы прессования от перемещения пресс-пуансона, характерная для процесса завершения второй стадии уплотнения смеси.

В процессе получения заготовок методом порошковой металлургии, как правило, требуется внешний подвод тепла. При отсутствии такового необходима оснастка, жесткость которой позволит выдержать деформацию материала. Для формирования прессовок из полимерных дисперсных композиций внешний подвод тепла не требуется, поэтому при обработке результатов эксперимента жесткостью пресс-матрицы пренебрегаем. Для проведения натурального эксперимента выбран полимерный модельный материал – парафин марки Т1 шаровидной формы. Элементы смеси, с целью визуализации процесса, были выполнены с $\varnothing = 10$ мм и размещались в пресс-форме в один слой. Для снижения влияния трения о стенки пресс-матрицы на начальном этапе уплотнения компоненты смеси размещены с зазором. Перед деформированием компоненты в пресс-матрице расположены в соответствии с рис. 1.

Из рис. 1 видно, что наиболее плотная упаковка элементов системы характерна для гексагонального их размещения в пресс-форме (вариант 3), а наличие арок при свободной засыпке (вариант 2) должно привести к наименьшим (из трех представленных вариантов) усилиям на первой стадии уплотнения.

На рис. 2 и 3 представлены диаграммы значений силы (Н), затрачиваемой на уплотнение шарообразных элементов из полимерного материала, от перемещения (мм) пресс-пуансона при одностороннем уплотнении полимерного изотропного материала с начальными упаковками согласно рис. 1 со скоростью 0,5 мм/с и 3 мм/с соответственно. На диаграммах представлены этапы прессования, соответствующие началу уплотнения смеси и завершению второй стадии описанного выше идеализированного процесса уплотнения, при котором деформация в приконтактной зоне сферических элементов системы носит ограниченно-локальный характер. Завершение этой стадии

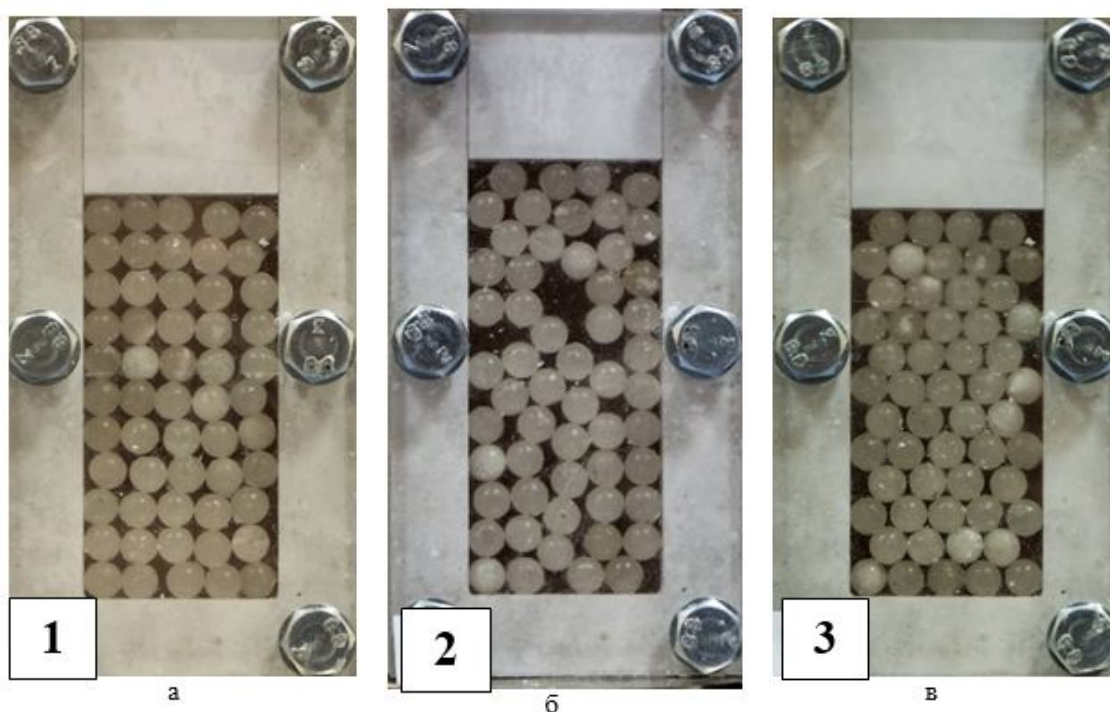


Рис. 1. Варианты размещения элементов, изготовленных из модельной массы, в пресс-форме: 1 – кубическая упаковка; 2 – свободная засыпка, 3 – гексагональная упаковка

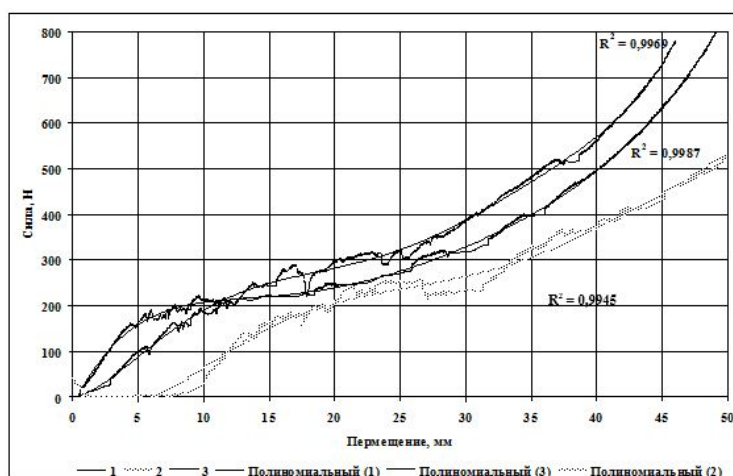


Рис. 2. Зависимость силы (Н), затрачиваемой на уплотнение шарообразных элементов из полимерного материала, от перемещения (мм) пресс-пуансона со скоростью 0,5 мм/с с различной начальной упаковкой элементов в пресс-матрице: 1 – кубическая, 2 – свободная, 3 – гексагональная

представляется весьма условным и, в общем случае, иллюстрирует фактическое распределение элементов в системе, после которого начинается пластическое течение материала.

Зависимости, представленные на рис. 2 и 3, соответствуют перемещениям пресс-пуансона на 50 мм (т. е. $\sim 55\%$ от начальной высоты размещенных в пресс-форме элементов смеси), при которых объемная плотность ($\rho_{об}$) воскообразных компонентов смеси до деформирования составляет 1,3-1,4 от их насыпной плотности ($\rho_{нас}$). Насыпная плотность фракции полимерного материала составляет $\rho_{нас} \sim 0,5 \text{ кг/м}^3$. Дальнейшее прессование характеризуется интенсивным увеличением сопротивления деформированию материала при относительно небольших перемещениях пресс-пуансона для всех рассмотренных вариантов начальной упаковки элементов в пресс-матрице.

Очевидно, что расположение элементов в пресс-матрице перед началом прессования материала оказывает значительное влияние на характер его уплотнения. Для уплотнения гексагонально упакованных элементов порошкового тела требуются значительно более высокие энергетические затраты на первой стадии прессования. Первая стадия прессования структуры со свободной упаковкой, напротив, характеризуется малозначительным усилием, затрачиваемым на перемещение пресс-пуансона.

Для всех вариантов начальной упаковки при повышении скорости прессования характерно сокращение второй стадии уплотнения, при которой должно наблюдаться завершение процесса максимально плотной упаковки элементов полимерного материала, сопротивляющегося сжатию. С увеличением скорости деформирования материала растет его сопротивление сжатию и требуются большие усилия для уплотнения порошкового тела.

Для исключения влияния “арок” на процесс деформирования смесей модельного материала необходима их предварительная подготовка. Выключение двух первых стадий из процесса прессования на практике возможно принудительным распределением элементов порошкового тела, например, встряхиванием [14]. При этом на эффективность указанного процесса предположительно влияют размеры емкости, в которую помещены компоненты модельного материала и их гранулометрические параметры. Экспериментальное подтверждение данного предположения проводили путем встряхивания засыпанного в цилиндрическую емкость материала различных фракций. Емкость с помещенным в нее путем свободной засыпки модельным материалом, встряхивали с частотой осевой вибрации 300 ударов в минуту при амплитуде встряхивания $3,0 \pm 0,2 \text{ мм}$. Параметры емкости: $\varnothing = 35 \text{ мм}$; высота $h = 80 \text{ мм}$; внутренний объем $V = 76,93 \text{ см}^3$. В ходе эксперимента использован модельный материал фракций 0,63, 1,0 и 1,6 мм. Изменяемый параметр – время встряхивания. На рис. 4. представлены зависимости утряски различных фракций дисперсного модельного материала от времени встряхивания.

Из рис. 4 видно, что после 5 мин уплотнения встряхиванием деформация порошков модельного материала прекращается. Насыпные плотности модельного материала фракций 0,63, 1,0 и 1,6 мм составили $0,3523 \text{ г/см}^3$, $0,3457 \text{ г/см}^3$ и $0,3379 \text{ г/см}^3$ соответственно. Плотность рассматриваемых модельных материалов повышается пропорционально утряске. Таким образом, деформация порошков модельного материала, прошедших предварительную подготовку в ходе уплотнения встряхиванием, должна осуществляться посредством разрушения частиц порошкового тела.

Полученные в результате эксперимента выводы не позволяют, однако, в полной мере судить о качественных характеристиках получаемой прессовки, а именно об упругом последствии материала и равномерности распределения свойств в ее объеме.

Корректное определение влияния скорости прессования на распределение свойств в объеме прессовки может быть возможным при исключении из процесса уплотнения

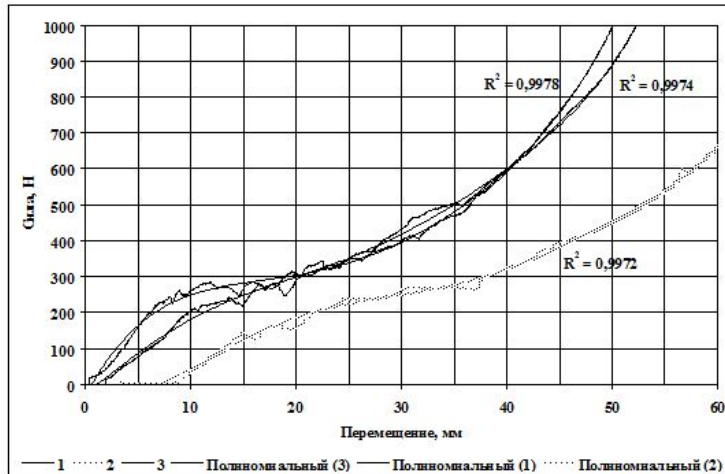


Рис. 3. Зависимость силы (Н), затрачиваемой на уплотнение шарообразных элементов из полимерного материала, от перемещения (мм) пресс-пуансона со скоростью 3 мм/с с различной начальной упаковкой элементов в пресс-матрице: 1 – кубическая, 2 – свободная, 3 – гексагональная

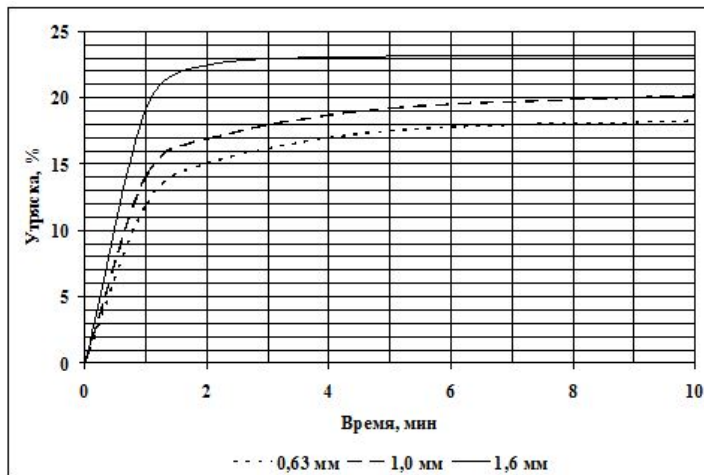
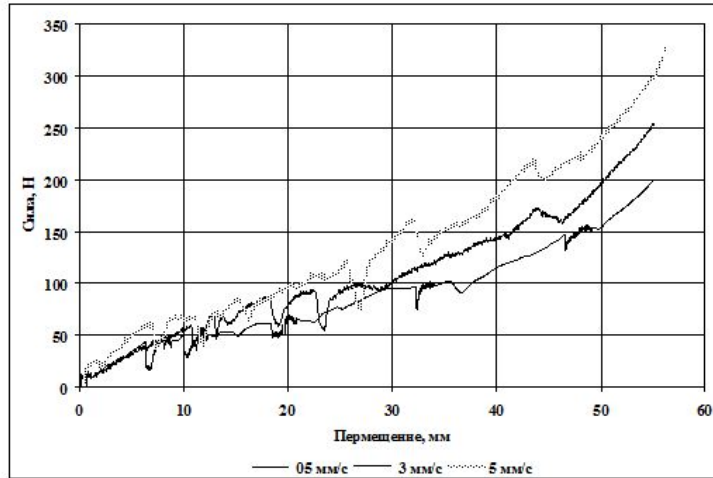


Рис. 4. Зависимость утряски порошкового модельного материала от времени встряхивания

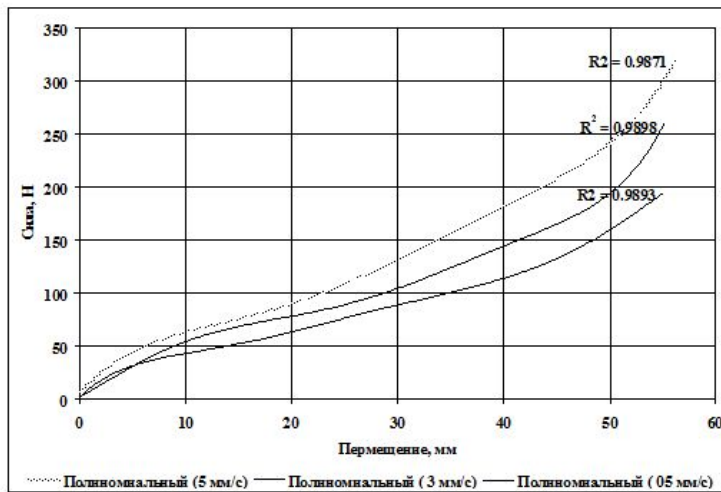
порошкового тела первой стадии, при которой в идеализированном процессе проходит его структурная деформация. С этой целью шаровидные полимерные элементы последовательно помещались в пресс-матрицу, как показано на рис. 6, и подвергались одноосному нагружению при различных скоростях перемещения пресс-пуансона. Такая упаковка элементов не допускает горизонтальных перемещений в пресс-форме, и нагрузка от элемента к элементу передается с самого начала уплотнения, при котором происходит деформирование самих элементов уплотняемой системы.

На рис. 5. приведены фактические значения и результаты полиномиальной аппроксимации зависимостей перемещения (мм) пресс-пуансона от силы (Н) при одноосном уплотнении столба парафиновых шаров и различных скоростях прессования. Из анализа зависимостей, представленных на рис. 4, видно, что на силу сопротивления

материала деформированию оказывает влияние только скорость перемещения пресс-пуансона. Вывод: с повышением скорости деформирования адекватно увеличивается сила сопротивления деформируемого материала.



а



б

Рис. 5. Зависимость перемещения (мм) пресс-пуансона от силы (Н) при одноосном уплотнении столба парафиновых шаров и различных скоростях прессования:

а – фактические значения; б – полиномиальная аппроксимация

Однако очевидность влияния скорости прессования на равномерность распределения напряжений в уплотненном теле в нашем случае удастся установить только визуально. На рис. 6 визуально представлена динамика зарождения разрушений в элементах уплотняемой системы при одноосном деформировании с различными скоростями перемещения пресс-пуансона (от 0,5 до 5 мм/с).

Из рис. 6 видно, что появление цветовых изменений в виде белых пятен (свидетельствующих о начале разрушения полимерных элементов) в ходе деформации представляется более равномерным при скорости 0,5 мм/с (рис. 6а). Увеличение скорости прессования на порядок (рис. 6в) приводит к формированию фронта разрушения в зоне контакта уплотняемого порошкового тела с пресс-пуансоном. Разрушение элементов, размещенных в диаметрально-противоположной стороне порошкового тела, начинается только тогда, когда деформация превышает 50%. Таким образом, повышение скорости уплотнения полимерного порошкового тела неизбежно приведет к структурной неоднородности и неравномерности напряжений в прессовке.

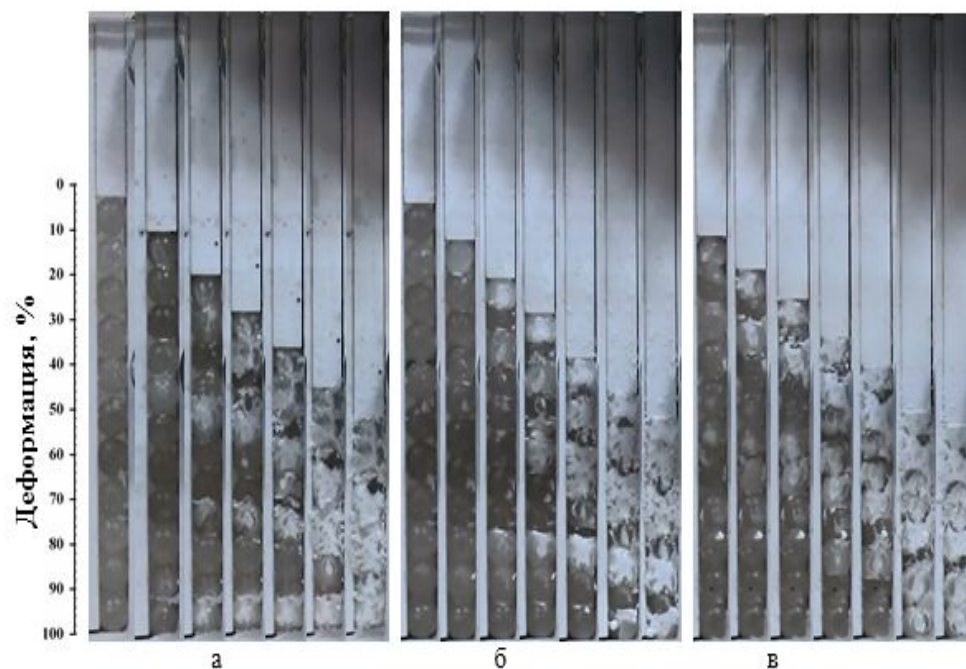


Рис. 6. Динамика зарождения разрушений в элементах уплотняемой системы при одноосном деформировании: а – скорость 0,5 мм/с; б – скорость 3 мм/с; в – скорость 5 мм/с

Экспериментально установлено, что упаковка полимерных элементов модельного материала в пресс-матрице перед началом прессования материала влияет на характер его уплотнения: чем ниже степень свободы элементов перед началом уплотнения, тем более высокие энергетические затраты требуются на его осуществление. Увеличением скорости деформирования материала приводит к росту сопротивления сжатию, что также требует увеличения усилий для уплотнения порошкового тела. Для получения прессовки с равномерным распределением свойств в ее объеме необходима предварительная подготовка смеси модельного материала встряхиванием и уплотнение порошкового тела с минимальной скоростью.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Литье по выплавляемым моделям / под. общ. ред. В. А. Озерова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1994. 448 с.

- [2] Сапченко И. Г., Жилин С. Г., Комаров О. Н. Управление структурой и свойствами пористых комбинированных удаляемых моделей. Владивосток: Дальнаука, 2007. 138 с.
- [3] Сапченко И. Г., Жилин С. Г. Влияние пористости моделей на их свойства, качество оболочковых форм и отливок // Литейное производство. 2003. № 4. С. 12–15.
- [4] Патент № 2188735 RU. Способ изготовления выплавляемых моделей / Сапченко И. Г., Жилин С. Г., Костина Т. В., Некрасов С. А. // Оpubл. 10.09.2002. Бюл. № 25.
- [5] Патент РФ № 2227769 Способ изготовления удаляемых моделей / Сапченко И. Г., Жилин С. Г. // Оpubл. 27.04.2004, Бюл. № 12.
- [6] Жилин С. Г., Сапченко И. Г., Комаров О. Н. Упругий отклик прессовок при деформировании гетерогенных порошковых материалов // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2015. № 4 (26). С. 163–168.
- [7] Медведев Я. И., Валисовский И. В. Технологические испытания формовочных материалов. М., Машиностроение, 1973. 312 с.
- [8] Орлов Г. М. Текучесть формовочных смесей // Теория формовки. М.: Изд-во АН СССР, 1961 (Тр. 6-го совещ. По теории литейных процессов)
- [9] Цытович Н. А. Механика грунтов. М.: Высш. шк., 1973
- [10] Сапченко И. Г., Жилин С. Г., Евстигнеев А. И. Об особенностях проектирования оснастки при изготовлении пористых выплавляемых моделей // Литейное производство. 2010. №2, С.26–31.
- [11] Болдин А. Н. О деформации формовочной смеси при импульсном уплотнении // Литейное производство. 2006. № 6. С. 15.
- [12] Жилин С. Г., Сапченко И. Г. Влияние упругого отклика деформируемого порошкового полимерного материала на размерно-геометрические параметры прессовки // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сборник докладов (Казань, 20–24 августа 2015 г.). Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2015., С. 1383–1385.
- [13] Жилин С. Г., Сапченко И. Г., Комаров О. Н. Экспериментальное определение деформаций, возникающих при изменении скорости формирования прессовок из гетерогенных материалов на полимерной основе // “Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред”. Сборник материалов Всероссийской научной конференции. Москва, 15 – 17 декабря 2015 г. – М.: ИПРИМ РАН, 2015. С. 126–129.
- [14] Кипарисов С. С., Либенсон Г. А. Порошковая металлургия: Учебник для техникумов – 3-е изд., перераб. – М.: Металлургия, 1991. 432 с.

S. G. Zhilin, I. G. Sapchenko, O. N. Komarov

FORMATION OF COMPACTS FROM POWDERS OF POLYMER ISOTROPIC MATERIAL

Institute of engineering science and Dalno's metallurgy east office of the Russian Academy of Sciences, Komsomolsk-on-Amur, Russia

Abstract. Elastic response of the material is the significant disadvantage during process of formation of compacts from disperse polymer materials used in special types of casting. Certain difficulties in view of this effect come out from volume anisotropy of properties of the obtaining compacts and poor precision of finite size prediction. This paper presents results and analysis of data obtained during experiment. Different variants of elements' positioning in former block, where it may be obtained by pressing, are considered. By varying of speed of compacts forming is achieved reduction of anisotropy, that allows to predict the finite size of forming product, which is important in the design of equipment for press forming.

Keywords: stress-strain state, press forming, porosity, heterogeneous materials, dimensional and geometrical accuracy, elastic response, precision casting.

REFERENCES

- [1] Litje po vyplavlyaemym modelyam / pod. obshch. red. V. A. Ozerova. – 4-e izd., pererab. i dop. – M.: Mashinostroenie, 1994. 448 s. (in Russian).
- [2] Sapchenko I. G., Zhilin S. G., Komarov O. N. Upravlenie strukturaj i svojstvami poristykh kombinirovannykh udalyaemykh modelej. Vladivostok: Dal'nauka, 2007. 138 s. (in Russian).
- [3] Sapchenko I. G., Zhilin S. G. Vliyanie poristosti modelej na ih svojstva, kachestvo obolochkovykh form i otlivok / Litejnoe proizvodstvo. 2003. № 4. S. 12–15. (in Russian).
- [4] Patent № 2188735 RU. Sposob izgotovleniya vyplavlyaemykh modelej / Sapchenko I. G., Zhilin S. G., Kostina T. V., Nekrasov S. A. // Opubl. 10.09.2002. Byul. № 25. (in Russian).
- [5] Patent RF № 2227769 Sposob izgotovleniya udalyaemykh modelej / Sapchenko I. G., Zhilin S. G. // Opubl. 27.04.2004, Byul. № 12. (in Russian).
- [6] Zhilin S. G., Sapchenko I. G., Komarov O. N. Uprugij otklik pressovok pri deformirovanii geterogennykh poroshkovykh materialov // Vestnik CHGPU im. I. YA. YAKovleva. Seriya: Mekhanika predel'nogo sostoyaniya. 2015. № 4 (26). S. 163–168. (in Russian).

Zhilin Sergey Gennayedyevich

e-mail: zhilin@imim.ru, PhD, manager laboratory, Institute of engineering science and Dalno's metallurgy east office of the Russian Academy of Sciences, Komsomolsk-on-Amur, Russia.

Sapchenko Igor Georgiyevich

e-mail: mail@imim.ru, Doctor of Engineering, Associate Professor, Deputy Director on Scientific Questions, Institute of engineering science and Dalno's metallurgy east office of the Russian Academy of Sciences, Komsomolsk-on-Amur, Russia.

Komarov Oleg Nikolaevich

e-mail: autor@imim.ru, PhD, Associate Professor, leading scientific employee, Institute of engineering science and Dalno's metallurgy east office of the Russian Academy of Sciences, Komsomolsk-on-Amur, Russia.

- [7] Medvedev Y. I., Valisovskij I. V. Tekhnologicheskie ispytaniya formovochnyh materialov. M.: Mashinostroenie, 1973. 312 s. (in Russian).
- [8] Orlov G. M. Tekuchest' formovochnyh smesej // Teoriya formovki. M.: Izd-vo AN SSSR, 1961 (Tr. 6-go soveshch. Po teorii litejnyh processov) (in Russian).
- [9] Cytovich N. A. Mekhanika gruntov. M.: Vyssh. shk., 1973. (in Russian).
- [10] Sapchenko I. G., Zhilin S. G., Evstigneev A. I. Ob osobennostyah proektirovaniya osnastki pri izgotovlenii poristyh vyplavlyaemyh modelej // Litejnoe proizvodstvo. 2010. № 2. S. 26–31. (in Russian).
- [11] Boldin A. N. O deformacii formovochnoj smesipri impul'snom uplotnenii // Litejnoe proizvodstvo. 2006. № 6. S. 15. (in Russian).
- [12] Zhilin S. G., Sapchenko I. G. Vliyanie uprugogo otklika deformiruемого poroshkovogo polimernogo materiala na razmerno-geometricheskie parametry pressovki // XI Vserossijskij s"ezd po fundamental'nym problemam teoreticheskoy i prikladnoj mekhaniki: sbornik dokladov (Kazan', 20–24 avgusta 2015 g.). Kazan': Izd-vo Kazan. un-ta, 2015. S. 1383–1385. (in Russian).
- [13] Zhilin S. G., Sapchenko I. G., Komarov O. N. Eksperimental'noe opredelenie deformacij, vznikayushchih pri izmenenii skorosti formirovaniya pressovok iz geterogennyh materialov na polimernoj osnove // "Mekhanika kompozicionnyh materialov i konstrukcij, slozhnyh i geterogennyh sred". Sbornik materialov Vserossijskoj nauchnoj konferencii. M.: IPRIM RAN, 2015. S. 126–129. (in Russian).
- [14] Kiparisov S.S., Libenson G.A. Poroshkovaya metallurgiya: Uchebnik dlya tekhnikumov – 3-e izd., pererab. M.: Metallurgiya, 1991. 432 s. (in Russian).