Жилин С. Г.
S. G. Zhilin

**ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОЙ УПАКОВКИ КОМПОНЕНТОВ ПОРОШКОВОГО ТЕЛА
НА НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРЕССОВКИ
ПРИ УПЛОТНЕНИИ**

**EFFECT OF POWDER COMPONENT INITIAL PACKAGING ON STRESS-DEFORMED
STATE OF PRESSING WHEN SEALING**

Жилин Сергей Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Института машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681005, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, 1; тел.: +7 (4217) 54-95-39. E-mail: sergeyzhilin1@rambler.ru.

Mr. Sergey G. Zhilin – PhD in Engineering, Associate professor, Leading Researcher, Institute of Machinery and Metallurgy, Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681005, Khabarovsk region, Komsomolsk-on-Amur, 1 Metallurgists' str.; tel.: +7 (4217) 54-95-39. E-mail: sergeyzhilin1@rambler.ru.

Аннотация. Снизить затраты на механообработку можно при использовании технологии изготовления выплавляемых моделей прессованием порошков модельных композиций. При прессовании возможен упругий возврат уплотнённого материала, на величину которого влияют начальная плотность упаковки и скорость уплотнения. Для определения влияния начальной упаковки компонентов порошкового тела на напряжённно-деформированное состояние прессовки изготовлены шаровидные элементы, имитирующие компоненты порошковых модельных композиций. Элементы подвергались одноосному уплотнению при различной скорости до достижения стадии пластической деформации.

Summary. Reduction of the mechanic engineering cost can be realized using the technology of making melted models by pressing powders of model compositions. When pressing, the compacted material can be resiliently returned, the initial packing density and the compaction rate affect the value of which. To determine the effect of the initial packing of the powder components on the stress-strain state of the compact, spherical elements simulating the components of the powder model compositions are made. Elements were subjected to uniaxial compaction at different speeds until the stage of plastic deformation.

Ключевые слова: прессование, напряжённно-деформированное состояние, пористость, шаровидные элементы, воскообразный материал, удаляемая модель, размерно-геометрическая точность, порошок, пресс-матрица, начальная упаковка компонентов, гетерогенные материалы.

Key words: pressing, stress-strain state, porosity, spherical elements, waxy material, removable model, dimensional-geometric accuracy, powder, press matrix, initial packing of components, heterogeneous materials.

УДК 621.74.045:53.09

Работа выполнена в рамках государственного задания № 007-00285-18-00.

Введение

Последовательность операций при получении металлоизделий из отливок в литьё по выплавляемым моделям (ЛВМ) [1] состоит в изготовлении выплавляемых моделей, формировании на них керамических оболочек, прокатке и заливке оболочек, затвердевании расплава металла и механической обработке литой заготовки. Значительное число операций и большая номенклатура материалов определяют актуальность поиска вариантов сокращения затрат на механическую обработку литых заготовок при получении отливок повышенной размерно-геометрической точности. Объём операций, связанных с механической обработкой, может определяться необходимостью устранения неметаллических включений, исправления нарушений геометрии отливки или её

доведением до требований точности. Повысить точность отливок позволяет модернизация процесса получения выплавляемых моделей прессованием воскообразных модельных композиций, при котором материал требуется деформировать до значений плотности на 10 % меньших, чем плотность этого материала, получаемая в ходе естественного затвердевания расплава. Такой приём позволяет устранить усадочные явления и поверхностные неровности, снизить напряжения, возникающие в керамической форме в процессе выплавления модельной массы, а значит сократить затраты на механическую обработку литых заготовок [2; 3]. Достижение значений пористости моделей больших, чем 10 % без потери прочностных и эксплуатационных характеристик возможно при использовании модельных композиций с растворимыми компонентами [4]. Так как эти включения представляют собой растворимые в воде кристаллогидраты, физико-механические свойства которых значительно выше, чем у воскообразного материала основы прессованной модели, то при прессовании последней деформациям подвергается только воскообразный компонент. Терминологически вернее такие модели называть не выплавляемыми, а удаляемыми, так как процесс их удаления происходит в две стадии: удаление растворимого наполнителя и выплавление воскообразного материала. При получении моделей прессованием возможно появление дефектов, связанных с упругим возвратом уплотнённого материала, возникающим после снятия нагрузки [5; 6; 7]. Снижение размерно-геометрической точности моделей может являться результатом образования областей неравномерного уплотнения с различной величиной упругого отклика. Периферийные участки прессовки более подвержены обратной упругой деформации. Таким образом, получение удаляемых моделей с равномерным распределением свойств – технологически важная задача, достижимая при определённых режимах прессования [8; 9].

На выбор режима деформирования материала модели и, следовательно, формирование структуры прессовки оказывает влияние начальная упаковка модельного материала в пресс-матрице, фракционный и гранулометрический составы, а также равномерность распределения его компонентов. Согласно идеализированной кривой уплотнения смеси процесс характеризуется тремя основными стадиями [10]: структурной деформацией уплотняемой системы, ростом давления прессования без увеличения плотности прессовки и, наконец, пластической деформацией, охватывающей весь объём каждой частицы уплотняемого порошкового тела при отсутствии смещения межчастичных контактов. Воскообразные материалы характеризуются относительно высоким пределом текучести, начальная и конечная стадии уплотнения резко разграничены, а их прессование сопровождается взаимным наложением одновременно протекающих стадий порошкового тела.

Важным для достижения равномерного распределения свойств при уплотнении воскообразной основы удаляемой модели является перемещение частиц на первых двух стадиях [10; 11], так как именно распределение элементов, зафиксированных в уплотняемом теле перед началом пластической деформации, во многом определяет конечные свойства прессовки. Оценка параметров процесса уплотнения при использовании хлопьевидных фракций неправильной формы представляется затруднительной ввиду склонности такой формы материала к образованию арок. Для устранения этого эффекта целесообразно использовать шаровидную форму компонентов порошкового тела. Это позволит приблизить процесс уплотнения к идеальному и установить закономерность влияния скорости перемещения пресс-пуансона при прессовании материала до напряжённо-деформированного состояния прессовок. Регулированием скорости перемещения пресс-пуансона при уплотнении воскообразного материала прессовок возможно достижение меньшей анизотропии, что позволит прогнозировать конечные размеры формируемого изделия [12].

Актуальность эксперимента определяется необходимостью изучения влияния параметров уплотнения на формирование свойств прессовки и имеет потенциал использования в машиностроении при получении прессовок, конструировании оснастки.

Цели и задачи исследования

Целью работы является изучение влияния начальной упаковки компонентов порошкового тела на напряжённо-деформированное состояние прессовки при уплотнении для определения условий равномерного распределения напряжений в её структуре.

Для реализации поставленной цели решались следующие задачи:

- определение влияния упаковки однокомпонентного модельного материала и скорости перемещения пресс-пуансона на характеристики напряжённно-деформированного состояния прессовки в процессе её уплотнения до упаковки, соответствующей завершению стадии смещения межчастичных контактов, когда пластическая деформация охватывает весь объём прессовки;
- определение влияния скорости перемещения пресс-пуансона при уплотнении гетерогенного модельного материала с различным содержанием воскообразных и имитирующих растворимую добавку компонентов на характеристики напряжённно-деформированного состояния прессовки в процессе её уплотнения до упаковки, соответствующей завершению стадии смещения межчастичных контактов, когда пластическая деформация охватывает весь объём прессовки;
- определение наиболее благоприятного варианта начального размещения компонентов модельного и режима его уплотнения состава в пресс-форме, при котором достигается равномерное распределение свойств в прессовке перед началом пластической деформации.

Методы и материалы

При получении пористых удаляемых моделей прессованием используют композиции материалов, состоящих из равных фракций порошков, полученных рассевом. Неправильная ломаная форма частиц порошков таких материалов, как правило, характеризуется хлопьевидностью и разнотолщинностью [13]. Адекватно характеризовать распределение свойств в различных участках будущей прессовки, а также на стадиях уплотнения материала представляется затруднительным. Форма частиц модельного материала обуславливает возможность их самопроизвольного распределения в полости пресс-матрицы и влияет на степень её заполнения. С целью снижения угла естественного откоса материала при заполнении пресс-матрицы, а также достижения его равномерного распределения в массивных частях и поднутрениях пресс-матрицы предпочтительным является использование гранул модельных составов. Реализация поставленной цели осуществлялась в серии натурных экспериментов с использованием специализированной пресс-формы с внутренней поверхностью, образующей вертикально-ориентированный параллелепипед с размерами основания 10×50 мм и высотой 90 мм. В пресс-форме осуществляется одностороннее прессование шаровидных элементов диаметром $\varnothing = 10$ мм, размещённых в один слой по высоте, как показано на рис. 1.

Для проведения эксперимента применяли материалы различной плотности. Технологичность и эксплуатационная пригодность выплавляемых моделей в производственных условиях достигаются при использовании многокомпонентных модельных составов, например ПС 50/50 с равным содержанием парафина и стеарина. Для сокращения погрешности эксперимента в качестве воскообразного компонента выбран материал 1-й группы из классификации модельных составов [1] – парафин марки Т1, соответствующий ГОСТ 23683-89 «Парафины нефтяные твёрдые. Технические условия» [14]. К свойствам материала Т1, влияющим на параметры процесса его уплотнения, относится плотность, определяемая после свободной заливки [15]. С учётом распределённой пористости плотность Т1 составляет 0,86 г/см³. Так как при деформировании и уплотнении повышается температура материала, то изменяются его физико-механические характеристики, что определяет важность учёта температуры при описании картины деформации. Значение температуры плавления Т1, определённое с помощью дифференциально-термического анализатора Shimadzu DTG-60H, составляет 60 °С.

Поскольку предел прочности на сжатие растворимого компонента комбинированной удаляемой модели значительно выше прочности воскообразного, то в качестве материала, имитирующего растворимый компонент гетерогенной смеси, можно использовать сталь любой марки, например Ст45. Свойства стали 45 соответствуют ГОСТ 1050-2013 «Металлопродукция из легированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия» (модуль Юнга: 210 ГПа, плотность 7810 кг/м³) [16]. Принимаем, что деформация материала Ст45, используемого в эксперименте, близка к 0 %, а стальные шарообразные элементы служат только для передачи энергии прессования воскообразному компоненту смеси. При анализе экспе-

риментальных данных деформацией и изменениями физико-механических характеристик материала, имитирующего растворимый компонент, пренебрегаем.

Основная часть

В ходе эксперимента исследовалась зависимость деформации материала от нагрузки и особенностей расположения компонентов в форме. Визуальная оценка картины деформации компонентов модельного материала необходима для фиксации момента начала пластификации всего объёма материала. Такая оценка становится возможной при использовании прозрачной стенки в пресс-форме, выполненной с жёсткостью, достаточной для обеспечения сопротивления нагрузке, возникающей на этапе начала пластической деформации всего объёма уплотняемого тела. Деформации после такого нагружения становятся необратимыми. Эксперимент заключался в помещении шаровидных элементов в формообразующую полость пресс-матрицы с имитацией различных вариантов их упаковки с последующим уплотнением. Уплотнение в течение каждого из серии экспериментов, проводимых при помощи тестовой машины AG-X plus Shimadzu, осуществляли с постоянной скоростью перемещения пресс-пуансона. Эксперимент состоял из серий с двумя скоростями перемещения пресс-пуансона – 0,5 мм/с и 3 мм/с.

На рис. 1. представлены варианты вертикального однослойного размещения сферических элементов, имитирующих начальное распределение компонентов модельного состава в пресс-форме. Начальные условия уплотнения шарообразных элементов представлены в табл. 1. При этом варианты 4 и 5 размещения шарообразных элементов в пресс-форме имитировали состояние прессовки, приближённое к условиям 20%-го и 50%-го содержания в порошковом теле упругих элементов.

Из анализа данных табл. 1 и рис. 1 видно, что число контактов взаимодействующих между собой шарообразных элементов определяет плотность их упаковки и, соответственно, определит динамику уплотнения всей прессовки. Принимаем, что при уплотнении деформируются только шарообразные элементы. При определении доли начального объёма, занимаемого ими, из объёма внутренней полости пресс-матрицы следует вычесть сумму объёма стальных шаров (для вариантов 4 и 5). Наиболее плотное распределение достигается при вариантах упаковки 4 и 5.

Рис. 1. Варианты размещения шарообразных элементов в пресс-форме:

- 1 – свободная засыпка; 2 – кубическая упаковка; 3 – гексагональная упаковка;
4 – кубическая с 20 % упругих элементов; 5 – кубическая с 50 % упругих элементов

Таблица 1

Начальные условия формирования прессовок

Вариант размещения элементов	1	2	3	4	5
Внутренний объём пресс-матрицы, см ³	45	45	43,75	40	33,5
Насыпная плотность воскообразного компонента, кг/м ³	340	445	460	445	445
Число воскообразных элементов в пресс-матрице, шт.	34	45	45	35/45*	23/45*
Доля объёма воскообразных компонентов, %	40	52	54	59	65
*Числа 35 и 23 – числа воскообразных элементов из 45 всех шаровидных элементов					

На рис. 2 представлены экспериментальные результаты по определению влияния скорости перемещения пресс-пуансона на динамику изменения напряжения от деформации при различных вариантах начальной упаковки компонентов. Из рис. 2 видно, что при уплотнении прессовок со всеми вариантами начальной упаковки напряжения при 30 % деформации не превышают 0,5 МПа. В ходе эксперимента [2] установлено, что разрушение гексагонально упакованных элементов начинается при значениях деформации, превышающих 50 %. Превышение скорости перемещения пресс-пуансона более 3 мм/с для использованных в работе однородных воскообразных материалов приводит к получению прессовки с неравномерным упругим откликом по её периферии ввиду «фронта» уплотнения. Как видно из рис. 2, при повышении плотности начальной упаковки за счёт внесения в систему несжимаемых элементов различия кривых, характеризующих зависимости напряжений от деформаций, несущественны. Технологически оптимальным представляется вариант распределения элементов, при котором удельная плотность в любом участке прессовки одинакова по завершении 2-й стадии уплотнения. При увеличении скорости прессования происходит дестабилизация распределения плотности в уплотняющейся гетерогенной системе в результате фронтального характера уплотнения.

Как видно из табл. 1, внесение упругих компонентов позволяет увеличить долю воскообразной части в начальной упаковке за счёт повышения площади их контакта. Видно, что при наиболее плотной упаковке воскообразных элементов, характерной для варианта 5, пластическая стадия деформирования наступает уже при сокращении высоты прессовки на 50 %, а рост напряжения в прессовке носит асимптотический характер.

На рис. 2 символами $R_{0,5}^2$ и R_3^2 отмечены значения величин достоверности аппроксимации полиномиальных зависимостей, построенных по результатам реального эксперимента, полученных при скорости перемещения пресс-пуансона 0,5 мм/с и 3 мм/с соответственно. Такие значения величин достоверности позволяют упростить описание результатов экспериментов по сглаженным аппроксимированным зависимостям. В связи с этим данные, представленные в табл. 2, отражают средние значения напряжений, полученных с аппроксимированных кривых при изменении значений деформации уплотняемой системы с шагом 10 %.

Таблица 2

Зависимость напряжения от деформации
при различных вариантах начальной упаковки деформируемой системы

Деформация, %		Напряжение ($\sigma_{0,5}/\sigma_3$), МПа					
		10	20	30	40	50	60
Варианты размещения элементов в пресс-форме	1	0,05/0,15	0,38/0,42	0,46/0,59	0,53/0,76	0,71/1,15	0,97/1,75
	2	0,29/0,29	0,5/0,54	0,64/0,68	0,65/0,78	1,15/1,17	1,6/1,6
	3	0,37/0,43	0,48/0,58	0,55/0,67	0,66/0,82	0,96/1,17	1,43/1,72
	4	0,26/0,28	0,36/0,38	0,47/0,48	0,66/0,66	0,9/1,0	-/-
	5	0,33/0,28	0,33/0,41	0,46/0,53	0,39/0,75	1,6/1,5	-/-
Примечание – $\sigma_{0,5}/\sigma_3$ – напряжения, полученные при скорости перемещения пресс-пуансона, равной 0,5 мм/с и 3 мм/с соответственно							

Из анализа данных табл. 2 видно, что максимальные напряжения, характерные для полностью пластической стадии прессования, достигаются для разных вариантов начальной упаковки воскообразных элементов уплотняемой системы при различных значениях степени их деформации. Весь объем прессовки, состоящей из воскообразных элементов, охватывается пластической деформацией по достижении 60 %, а значения напряжений для этих случаев выше, чем для вариантов упаковки элементов 4 и 5. Чем выше начальная плотность воскообразного компонента в модельной композиции, тем меньшее влияние оказывает скорость уплотнения на напряженно-деформированное состояние прессовки.

Рис. 2. Зависимости напряжения от деформации: а – свободная упаковка; б – кубическая; в – гексагональная; г – кубическая с 20 % упругих элементов; д – с 50 % упругих элементов

Выводы

Таким образом, для формирования удаляемой модели прессованием воскообразных компонентов величина напряжений регулируется скоростью уплотнения и начальной упаковкой материала в пресс-матрице, которая для однокомпонентных систем характеризуется насыпной плотностью. Чем меньше насыпная начальная плотность однокомпонентного материала, тем большее расхождение значений напряжений при деформировании прессовок с увеличением скорости прессования.

Для многокомпонентных систем насыпная плотность материала для прогнозирования напряжений конечной прессовки представляется не столь существенной, так как на её величину влияют физико-механические характеристики упругих компонентов. Растворимые материалы более стойки к деформациям, чем воскообразный материал основы, и служат для передачи нагрузки. Наличие в модельной массе более 50 % «упругих» компонентов ведёт к неравномерному увеличению напряжений при деформации, большей величине упругого отклика прессовки ввиду сокращения в ней пространства для релаксации уплотнённого материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Литъё по выплавляемым моделям / В. Ф. Гаранин, В. Н. Иванов, С. А. Казеннов [и др.]; под. ред. В. А. Озерова. – М.: Машиностроение, 1994. – 448 с.
2. Жилин, С. Г. Особенности формирования пористой структуры прессовок из полимерного дисперсного материала / О. Н. Комаров, А. А. Соснин, Д. А. Потянихин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2016. – № IV-1(28). – С. 26-338.
3. Патент 2632051 Российская Федерация, МПК⁷ B22C7/02. Способ изготовления выплавляемых моделей / Жилин С. Г., Комаров О. Н., Соснин А. А., Панченко Г. Л.; заявитель и патентообладатель Институт машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук; заявл. 13.05.2016; опубл. 02.10.2017. Бюл. № 28. – 3 с.
4. Жилин, С. Г. Управление структурой и свойствами пористых комбинированных удаляемых моделей: дис. ...канд. техн. наук: 05.16.04: защищена 16.05.2002 / Жилин Сергей Геннадьевич. – Комсомольск-на-Амуре, 2002. – 218 с. – Библиогр.: С. 92-104.
5. Буренин, А. А. Упругий отклик среды при развитии, остановке и повторном вязкопластическом течении, включая мгновенную разгрузку // Фундаментальные проблемы теоретической и прикладной механики. Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. – 2011. – № 4(5). – С. 2043-2044.
6. Рыбин, В. В. Большие пластические деформации и разрушение металлов / В. В. Рыбин. – М.: Металлургия, 1986. – 224 с.
7. Винокуров, Г. Г. Статистическое моделирование корреляции локальной плотности макроструктуры при одностороннем прессовании порошковых материалов / Г. Г. Винокуров, О. Н. Попов // Известия Самарского научного центра РАН, 2011. – Т. 13. (№ 1–3). – С. 553-557.
8. Рожкова, Т. В. Исследование влияния межчастичных контактов на процесс предварительного прессования порошкового материала / Т. В. Рожкова, В. Н. Кусков, Н. И. Смолин // Агропродовольственная политика России. – 2017. – № 11(71). – С. 140-144.
9. Жилин, С. Г. 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.
10. Медведев, Я. И. Технологические испытания формовочных материалов / Я. И. Медведев, И. В. Валисовский. – М.: Машиностроение, 1973. – 312 с.
11. Орлов, Г. М. Текучесть формовочных смесей / Г. М. Орлов // Теория формовки. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – 211 с.
12. Жилин, С. Г. Моделирование процессов обработки материалов давлением на основе оценки напряжённо-деформированного состояния прессовок из полимерных композиций с использованием метода конечных элементов / С. Г. Жилин, О. Н. Комаров, А. А. Соснин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2017. – Т. 19. – № 2. – С. 48-66.
13. Жилин, С. Г. Экспериментальное определение параметров регрессионной зависимости Кольрауша для пористых прессовок из воскообразных порошковых композиций / С. Г. Жилин, О. Н. Комаров, Д. А. Потянихин, А. А. Соснин // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2018. – № 2(74). – С. 9.
14. ГОСТ 23683-89. Парафины нефтяные твёрдые. Технические условия. – Введ. 1991-01-01. – М.: Стандартинформ, 2007. – 13 с.
15. Жилин, С. Г. 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.
16. ГОСТ 1050-2013. Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия. – Введ. 2015-01-01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 31 с.