

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

ВЛИЯНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА И СКОРОСТИ ВЫДАВЛИВАНИЯ ВОСКООБРАЗНОЙ КОМПОЗИЦИИ НА ГЕОМЕТРИЮ ДЛИННОМЕРНОЙ ПРЕССОВКИ ПРИ МУНДШТУЧНОМ ЭКСТРУДИРОВАНИИ

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

Аннотация. Основной проблемой при изготовлении изделий деформированием порошков, состоящих из воскообразных материалов, применяемых для получения литейных выплавляемых моделей, является отсутствие однородности физико-механических свойств получаемой прессовки, результатом которой является неравномерный упругий отклик уплотненного материала. В работе приведены результаты экспериментального определения параметров процесса получения длинномерного элемента прессовки мундштучным выдавливанием. Определено, что изменением фракционного состава уплотняемых материалов и скорости перемещения пресс-пуансона возможно регулирование конечных свойств длинномерных прессовок из ряда воскообразных материалов с целью получения прогнозируемых значений их упругого отклика. На основе экспериментальных данных предложены варианты решения проблемы упругого отклика прессовок. Получение длинномерного элемента прессовки с наиболее равномерным упругим откликом позволяет прогнозировать точность и учитывать ее размерные параметры при проектировании пресс-оснастки.

Ключевые слова: нагрузка, прессовка, напряженно-деформированное состояние, прессование, пористость, воскообразные материалы, размерно-геометрическая точность, упругий отклик, пресс-матрица

УДК: 621.74.045

© Жилин С. Г., Богданова Н. А., Комаров О. Н., 2018

Жилин Сергей Геннадьевич

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

Богданова Нина Анатольевна

e-mail: joyful289@inbox.ru, младший научный сотрудник Института 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 Института машиноведения и металлургии ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия.

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

Поступила 11.09.2018

Особенностью получения литых изделий является фазовый переход материала, формирующего тело отливки. Твердый материал, вне зависимости от его химического состава и структуры, претерпевает изменение формы в результате теплового воздействия при расплавлении и последующем охлаждении. Геометрия получаемого изделия во многом определяется параметрами этого теплового воздействия и может быть с достаточной степенью вероятности просчитана при помощи известных пакетов прикладных программ [1]. Диапазон значений температур нагрева материала выше температуры его плавления, как правило, влияет на размер открытой усадочной раковины или внутренней газовой поры, формирующейся при переходе материала из жидкого фазового состояния в твердое [2]. Такие дефекты приводят к нарушению геометрии изделия, снижению его плотности, а, следовательно, прочностных и эксплуатационных характеристик [3, с.14-15]. При проектировании технологии получения изделий литьем закладывается фактор их разнотолщинности, который определяет время охлаждения расплава в различных частях изделия и вероятность появления неоднородности структуры литого изделия. Возникающие при затвердевании отливок остаточные напряжения вызывают коробление стенок или появление трещин [4, с.22-24]. На практике задача управления процессом формирования геометрии литого изделия решается рядом способов, среди которых: регулирование температуры заливки расплава материала в форму и скорости его охлаждения, обеспечение направленного затвердевания отливки. Первый вариант не является универсальным, т.к. материалы существенно отличаются по химическому составу, структуре и физическим свойствам, что влияет на интервал температур кристаллизации и позволяет решить проблему геометрии лишь частично. Второй вариант осуществляется в процессах т.н. литья намораживанием, которое может быть реализовано, например, центробежным способом [5, с.5-6]. Охлаждение корки материала в этом случае позволяет значительно сократить сжимающие изделие напряжения, что обеспечивается его пустотелостью. Однако полностью устранить усадочные дефекты при таком способе формирования поверхности не представляется возможным.

При формировании заготовок под давлением, либо запрессовкой порошкового материала, преимущественно с нагревом последнего, реализуется возможность получения изделий без усадочных пор. Однако, наличие остаточных напряжений в теле уплотненного порошкового изделия, как правило, приводит к упругому возврату материала после снятия нагрузки и остывания прессовки.

Несколько сократить упругий отклик материала прессовки возможно в процессе «холодного» уплотнения его порошка. При таком способе влияние температурного фактора на изменение геометрии прессовки при остывании материала сводится к минимуму. Однако вероятность упругого отклика материала остается высокой. Поиск вариантов управления величиной упругого отклика материала прессовки определяет актуальность проведенных исследований, имеющих широкий спектр практического применения. Например, при получении отливок повышенной размерно-геометрической точности методом литья по выплавляемым моделям последние изготавливают «холодным прессованием» порошков воскообразных модельных составов в жестких пресс-матрицах [6, с.28]. При уплотнении порошок модельной композиции пластифицируется под действием нагрузки, межчастичного трения и трения уплотняемого материала о стенки пресс-матрицы. В результате поверхность уплотненного изделия приобретает конфигурацию формообразующей поверхности пресс-матрицы. Свободный выход заблокированного в порах уплотняемого материала и находящегося под давлением

воздуха, затрудняется. При разгрузке материала уплотненной прессовки после раскрытия формообразующих элементов пресс-матрицы появляется упругий отклик, являющийся следствием суммарной релаксации воздуха и уплотненного воскообразного материала. Таким образом, для прессовок с сопоставимым соотношением размеров длин сторон величина упругого отклика в направлении продольном приложению давления прессования составляет $0,7 \div 1,2$ %, а в поперечном $0,4 \div 0,5$ %. Такой способ получения выплавляемой модели, безусловно, наиболее предпочтителен в сравнении с ее изготовлением свободной заливкой материала в пресс-форму, т.к. ее размеры искажаются значительно меньше. Так, например, величина объемной усадки для ряда воскообразных материалов достигает $8 \div 10$ % при условии, что температура их заливки незначительно превышает температуру плавления материала.

При получении выплавляемых моделей простой конфигурации прессованием порошков воскообразных композиций, в принципе, можно было бы завершить исследования, ограничившись набором экспериментальных данных, позволяющих учитывать величину упругого возврата уплотненного материала при проектировании размеров пресс-матрицы. Однако, при изготовлении комбинированных литейных моделей сложной пространственной конфигурации [7, с.8] из алюмотермитной и воскообразной смеси, напрессовку которой производят на значительно более плотный модельный блок, прогнозировать размерно-геометрические параметры получаемого изделия становится затруднительно. Напрессовку воскообразного компонента в этом случае производят в зазор между формообразующей полостью пресс-матрицы и алюмотермитным блоком для получения на нем поверхности, соответствующей по размерам готовому литому изделию. Поиск наиболее предпочтительных вариантов, с точки зрения получения прессовок с низким уровнем упругого отклика, из воскообразных материалов с различными теплофизическими характеристиками и фракциями определяет актуальность проводимых исследований.

Исходя из отмеченного выше, целью настоящей работы стало исследование влияния гранулометрического состава и скорости выдавливания воскообразных композиций, отличающихся фракцией и теплофизическими свойствами, на геометрию длинномерного элемента прессовки при мундштучной экструзии.

Для реализации поставленной цели решались следующие задачи:

- определение реальных температур плавления воскообразных материалов, применяемых для получения длинномерных элементов прессовок;
- определение предельной нагрузки, необходимой для выдавливания воскообразных материалов различных фракций из мундштука при постоянной скорости перемещения пресс-пуансона;
- определение предпочтительных фракций и скорости экструдирования материалов для получения длинномерной прессовки с минимальным значением упругого отклика.

Реализации целей и задач исследования в качестве уплотняемого порошкового тела были выбраны 2 воскообразных материала, относящийся к 1 классификационной группе [8, с.119]. Первый представляет собой парафин марки Т1 (по ГОСТ 23683-89. Парафины нефтяные твердые. Технические условия). Т1 имеет плотность при свободной заливке $0,86 \text{ г/см}^3$ с учетом распределенной пористости). Второй - ПС 50/50, представляющий собой двухкомпонентную композицию с равным содержанием парафина и стеарина (по ГОСТ 6484-96. Кислота стеариновая техническая. Технические

условия), полученную их сплавлением. В производственной практике стеарин сплавляют с парафином для улучшения его реологических характеристик, а именно пластичность и прочность. Интересным представляется факт образования эвтектического сплава ПС 50/50 с температурой плавления отличной от температур плавления ее составляющих. Температуры плавления определялись с помощью дифференциально-термического анализатора Shimadzu DTG-60H в ходе нагрева материалов со скоростью $2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ и составили для Т1 60°C , для стеарина 58°C , а для сплава ПС 50/50 52°C . Материалы Т1 и легкоплавкий ПС50/50 использовались в эксперименте в виде фракций хлопьевидной формы, полученной рассевом ситовым методом с использованием сит модели 026 по ГОСТ 29234.3-91 «Пески формовочные. Метод определения среднего размера зерна и коэффициента однородности». Предварительными экспериментами установлен технологически допустимый диапазон размеров частиц воскообразного компонента, составляющий $0,63 \div 2,5$ мм [9]. Применение фракции менее 0,63 мм технологически нецелесообразно ввиду незначительного количества материала, остающегося на ситах после отсева. Применение фракции материала более 2,5 мм не позволяет осуществить операцию заполнения протяженных поднутрений пресс-матрицы, формирующей выплавляемую модель. На рис.1,а и рис.1,б представлен внешний вид сплава ПС 50/50 фракций 0,63 мм и 2,5 мм соответственно. Отмеченные выше эвтектические свойства сплава ПС 50/50 подтверждаются не только меньшей температурой плавления относительно температур его компонентов, но и меньшей величиной усадки. На рис.1,в представлена стеклянная колба, заполненная сплавом ПС 50/50 с усадочной раковиной.

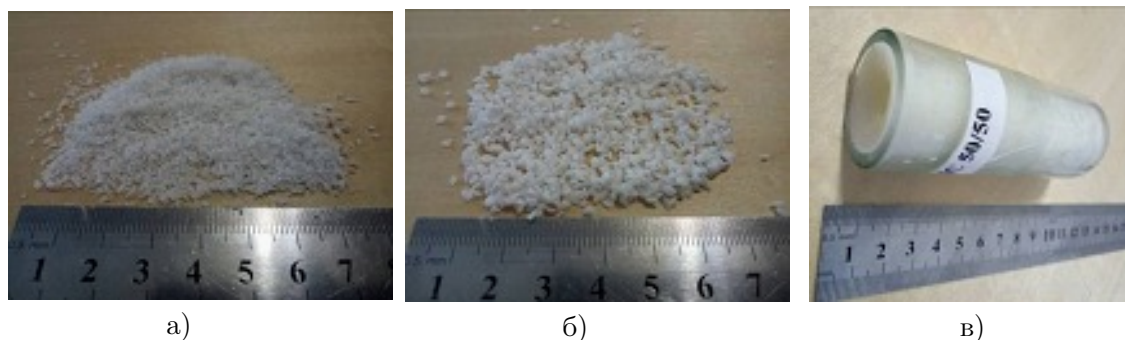


Рис. 1. Внешний вид фракций материала ПС 50/50 и усадочной раковины.

Объемную усадку сплавов на основе Т1 и стеарина определяли следующим образом: в колбу с внутренним объемом 60 см^3 заливали (до верхней кромки колбы) разогретый до 60°C расплав воскообразного материала, содержащий стеарин и парафин в диапазоне $0 \div 100\%$ по массе; колбу с расплавом охлаждали до температуры 20°C и после погружения в тарированный сосуд с водой определяли величину объемной усадки по количеству вытесненной воды. На рис.2 представлена зависимость объемной усадки воскообразного сплава с диапазоном содержания стеарина и парафина $0 \div 100\%$ по массе.

На рис.2 0% содержания парафина соответствует 100% содержания стеарина. Из рис.2 видно, что объемная усадка эвтектического легкоплавкого материала ПС 50/50

и композиции ПС 80/20 составляет немногим более 4%. Таким образом, предположительно, равные значения упругого отклика для парафина и ПС 50/50 достигаются при различных скоростях перемещения пресс-пуансона и, следовательно, различных скоростях экструзии. Это утверждение нуждается в экспериментальной проверке

Экспериментальная часть исследования осуществлялась при помощи тестовой машины AG-Xplus фирмы SHIMADZU. Тестовая машина обеспечивает отклонение от задаваемого значения нагрузки в интервале $0 \div 100$ кН не более 0,03% [10, с.6]. На рабочий стол машины устанавливалась пресс-матрица 1 (графическое поле рис.3), выполненная из стали, что позволяет осуществлять регистрацию нагрузки пренебрегая деформацией материала пресс-матрицы, считая ее упругим телом. Пресс-матрица имеет цилиндрическую внутреннюю поверхность с диаметром 45 мм. Донная часть пресс-матрицы снабжена крышкой 2 с мундштуком, как показано на рис.3. Конструкции крышки и мундштука позволяет обеспечить условие затрудненного выдавливания пластифицирующегося материала. Внутренний диаметр мундштука составляет 9 мм, что обеспечивает отношение площадей сечений деформируемой порошковой композиции и получаемой длинномерной прессовки 25 к 1. Такое отношение площадей гарантированно обеспечивает экструзию материала, претерпевшего нагрузку в ходе уплотнения, при котором происходит его пластификация. В пресс-матрицу помещали порошок модельной композиции 4 и при перемещении пресс-пуансона 3 осуществляли ее выдавливание из мундштука. Скорость перемещения пресс-пуансона в каждом эксперименте оставалась постоянной, но изменялась в ходе серии экспериментов в интервале значений $0,25 \div 1,5$ мм/с.

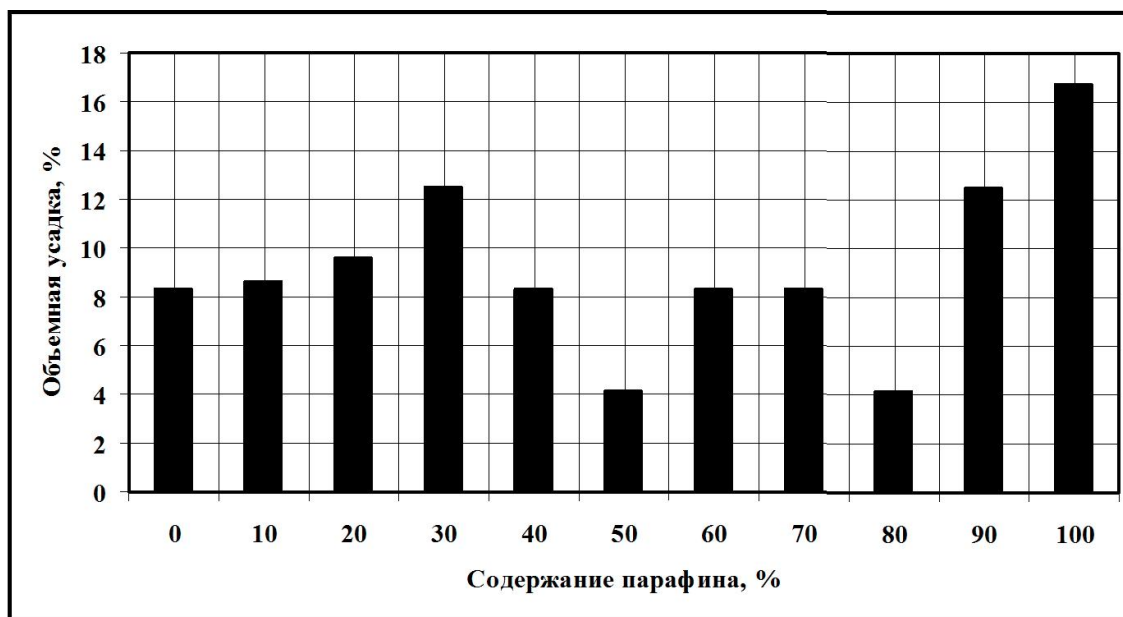


Рис. 2. Объемная усадка воскообразного сплава

В процессе получения длинномерной прессовки из воскообразного материала можно выделить следующие этапы:

- уплотнение материала в пресс-матрице, в ходе которого при перемещении пресс-пуансона происходит увеличение нагрузки;
- ламинарное истечение уплотненного материала, при котором начинается экструзия уплотненной воскообразной модельной массы из мундштука пресс-матрицы (характеризуется пиковым значением нагрузки);
- турбулентное истечение пластифицированного материала (поскольку в нашем случае скорость перемещения пресс-пуансона в каждом отдельном эксперименте не изменялась, то эта стадия не исследовалась).

Традиционное графическое отображение напряженно-деформированного состояния нагружаемого объекта в координатах «напряжение-деформация» в нашем случае использовать некорректно. При изменяющейся нагрузке (в ходе экструзии пластифицированного воскообразного материала через мундштук) и постоянной скорости перемещения пресс-пуансона корректно рассматривать систему в осях координат «нагрузка-перемещение».

В ходе предварительных экспериментов, проведенных при помощи описанного выше устройства, установлена предпочтительная скорость перемещения пресс-пуансона 0,5 мм/с при выдавливании материала Т1 фракции 0,63 мм [6, с.30-31], которая позволяет обеспечить минимальные значения упругого отклика длинномерной прессовки. Такая скорость перемещения пресс-пуансона обеспечивает фактическую скорость экструзии воскообразного материала равную 12 мм/с. На рис. 3 представлены зависимости нагрузки, возникающей на пресс-пуансоне от его перемещения при формировании длинномерной прессовки из материалов Т1 и ПС 50/50 фракций 0,63 и 2,5 мм через мундштук (диффузор).

Из рис.3 видно, что при одинаковых скоростях перемещения пресс-пуансона в процессе выдавливания воскообразных материалов, возникающие нагрузки существенно отличаются и зависят как от фракции материала, так и от его состава. Например, для модельной массы ПС 50/50 фракции 0,63 мм при скорости экструзии 12 мм/с величина нагрузки составляет 20 кН. Нагрузка, возникающая при экструзии эвтектического материала ПС 50/50 в среднем на 32 – 35 % меньше, чем в случае с Т1. При этом участки зависимостей, характеризующих изменение нагрузки от перемещения на стадии выдавливания ПС 50/50, отклоняются от параллельности оси абсцисс в большей мере, чем при выдавливании Т1. Такое падение нагрузки свидетельствует о протекании процесса плавления ПС 50/50 в ходе экструзии и неверном выборе ее скорости.

С увеличением скорости перемещения пресс-пуансона до 1,5 мм/с скорость экструзии возрастает до 36 мм/с, а значение нагрузки увеличивается более чем на 25 % и составляет 25 кН. Аналогично для других материалов. При увеличении скорости перемещения пресс-пуансона до 1,5 мм/с пластификация Т1 фракции 0,63 мм происходит при величине нагрузки на 30% большей, чем при уплотнении со скоростью перемещения пресс-пуансона 0,5 мм/с. В случае с материалами Т1 и ПС 50/50 фракции 2,5 мм увеличение нагрузки составляет 6%, и 8% соответственно. После начала экструзии происходит незначительное падение нагрузки и выход на стационарный режим выдавливания. На этом этапе для всех исследуемых воскообразных материалов разница в величинах нагрузок, соответствующих началу пластификации и выходу на стационарный режим, не превышает 10%.

Неправильный выбор скорости перемещения пресс-пуансона и, следовательно, скорости экструзии материала, неизменно должно сопровождаться нарушением геометрии получаемой длинномерной прессовки в виде усадки материала при его остывании или упругом отклике после релаксации.

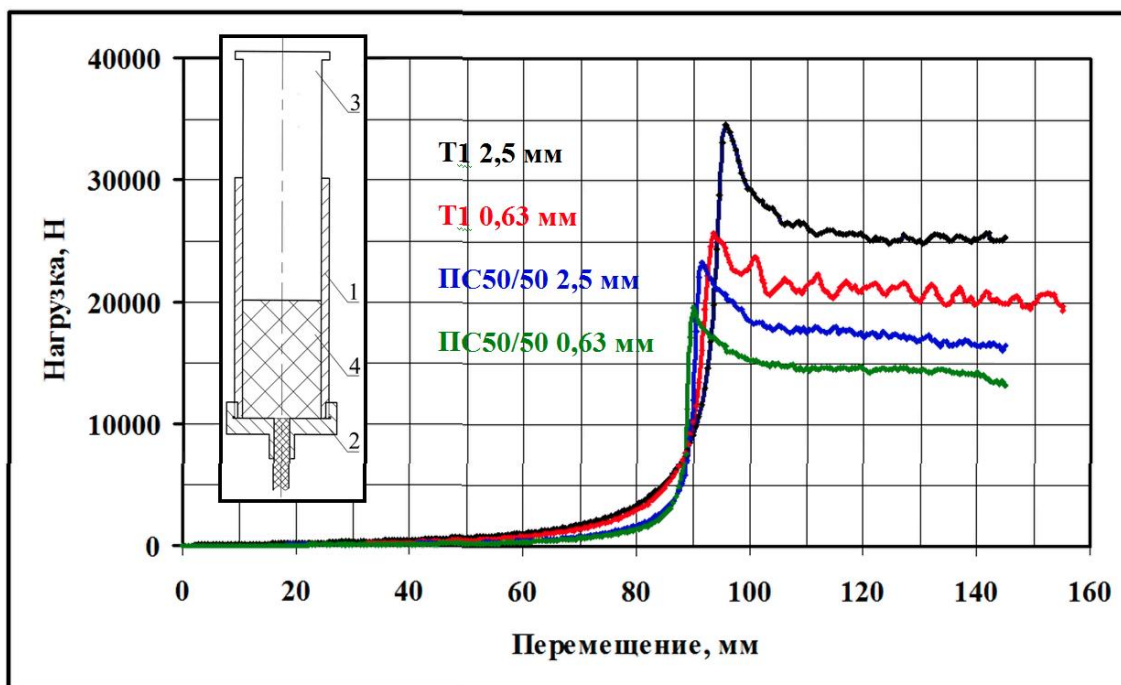


Рис. 3. Зависимость нагрузки от перемещения при скорости экструзии 12 мм/с и схема экструзии модельной композиции через мундштук: 1 – цилиндрическая пресс-матрица; 2 – крышка с мундштуком; 3 – пресс-пуансон.

Фиксация геометрических параметров осуществляли через каждые 50 мм по длине получаемой прессовки при помощи цифрового регистратора DIN 863 Vogel, обеспечивающего точность измерения 0,001 мм. Отклонение значений диаметров прессовки в местах измерений от внутреннего диаметра мундштука в положительную или отрицательную сторону позволяет регистрировать упругий отклик или усадку материала. Величину таких отклонений можно определить по формуле:

$$O = ((A_M - A_n) / A_n) \cdot 100\%,$$

где O – величина отклонения, %; A_M и A_n – контролируемые размеры внутреннего диаметра мундштука и внешнего диаметра длинномерной прессовки соответственно, мм.

На рис. 4 приведены средние значения отклонений размеров длинномерных прессовок круглого сечения, сформированных при мундштучном выдавливании в зависимости от скорости экструзии, фракции и вида воскообразного материала.

Из рис.4 видно, что скорость перемещения пресс-пуансона в значительной степени влияет на значение скорости экструзии, при которой, в свою очередь, создаются различные теплофизические условия формирования длинномерной прессовки, определяющие величину отклонения ее диаметра от внутреннего размера формообразующего мундштука.

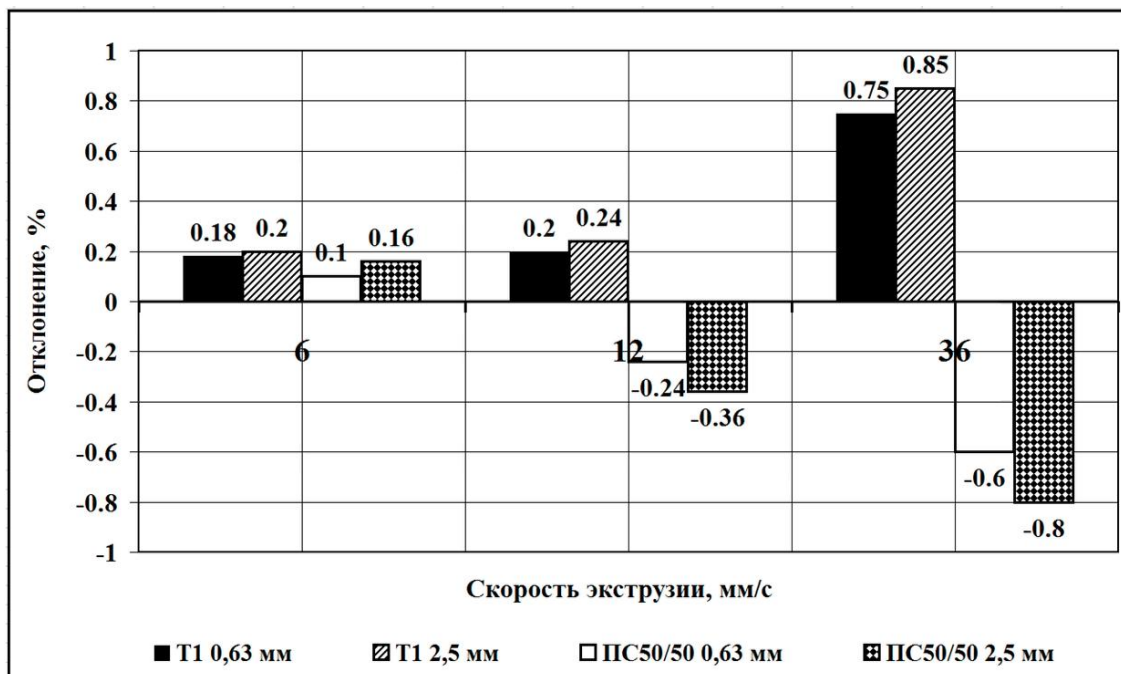


Рис. 4. Зависимость отклонений размеров длинномерной прессовки от скорости экструзии воскообразных материалов через мундштук.

Видно, что для материала Т1 наиболее технологически приемлемой является скорость диффузии, соответствующая 6 мм/с. Увеличение скорости диффузии Т1 приводит к значительному росту отклонения размеров прессовки от внутренних размеров мундштука, а снижение скорости существенно не влияет геометрические показатели получаемой прессовки. Для более легкоплавкого материала ПС 50/50 скорость экструзии более 6 мм/с является неприемлемой вследствие локального нагрева материала до температур, вызывающих усадочные явления в длинномерной прессовке после ее охлаждения. При получении изделий в пресс-матрицах с конструкцией, предполагающей совмещение образующих частей форм, фракция влияет на размерно-геометрические параметры и качество поверхности изделия и, безусловно, оказывает влияние на формирование теплофизических условий его получения. Однако, как видно из рис.4, фракция используемого материала, при формировании длинномерной прессовки выдавливанием, в целом, оказывает меньшее влияние, чем скорость экструзии и реологические свойства материала.

Таким образом, можно сделать вывод, что для всех исследуемых материалов с увеличением фракции выдавливаемого материала и (или) скорости перемещения пресс-пуансона нагрузка, создаваемой на нем возрастает. Для получения прогнозируемых

размеров длинномерной прессовки выдавливанием воскообразного компонента решающее значение имеет химический состав материала, определяющий теплофизические условия формирования прессовки.

Полученные в ходе исследования экспериментальные данные позволяют регулированием скорости экструзии, в зависимости от используемого модельного материала, получать в процессе его уплотнения протяженные элементы прессовок с минимальными отклонениями от формообразующих размеров мундштука, что позволит значительно повысить размерно-геометрическую точность конечных изделий.

ЛИТЕРАТУРА

[1]. Сушко Т. И., Бучнев А. В., Турищев В. В., Пашнева Т. В. Моделирование процессов затвердевания крупногабаритной стальной корпусной отливки с совершенствованием технологии изготовления // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2010. Т. 6. № 12. С. 44–47.

[2]. Кульбовский И. К., Карелин С. В., Попов Е. В., Туркин Д. А. Компьютерное моделирование процессов затвердевания и охлаждения массивных отливок из чугуна в литейной форме // Вестник Брянского государственного технического университета. 2008. № 2. С. 23–26.

[3]. Назаратин В. В. Технология изготовления стальных отливок ответственного назначения. М.: Машиностроение, 2006. 234 с.

[4]. Садова А. Н., Дебердеев Т. Р., Кузнецова О. Н., Стоянов О. В. Проблемы выявления и устранения возможных дефектов в процессе получения изделий из термопластов: учебное пособие. Казань : Изд-во Казан. гос. технол. ун-та, 2009. 123 с.

[5]. Юдин С. Б., Левин М. М., Розенфельд С. Е. Центробежное литье. М., «Машиностроение», 1972. 280 с.

[6]. Жилин С. Г., Комаров О. Н., Соснин А. А., Богданова Н. А. Влияние упругого отклика на размерно-геометрические характеристики протяженной прессовки, полученной из воскообразного материала мундштучным выдавливанием // Вестник ПНИПУ. Машиностроение. Металлургия. 2018. Т.20. №2. С. 27–34.

[7]. Жилин С. Г., Комаров О. Н., Соснин А. А., Предеин В. В. Получение литья повышенной размерной точности по комбинированным литейным моделям из алюмотермитных и воскообразных смесей // Заготовительные производства в машиностроении. 2016. №11. С. 6–11

[8]. Гаранин В. Ф., Иванов В. Н., Казеннов С. А. и др. Литье по выплавляемым моделям /под общ. ред. В.А. Озерова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1994. 448 с.

[9]. Жилин С. Г., Комаров О. Н., Соснин А. А. Панченко Г. Л. Способ изготовления выплавляемых моделей. Патент РФ № 2632051 Способ изготовления выплавляемых моделей / Заявл. 13.05.2016; Оpubл. 02.10.2017. Бюл. №28

[10]. Жилин С. Г., Комаров О. Н., Потянихин Д. А., Соснин А. А. Экспериментальное определение параметров регрессионной зависимости Кольрауша для пористых прессовок из воскообразных порошковых композиций //Инженерный журнал: наука и инновации. 2018. Вып. 2. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-2-1732>

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

INFLUENCE OF GRANULOMETRIC COMPOSITION AND EXTRUSION RATIO OF THE WAXY MATERIALS ON THE GEOMETRY OF EXTENDED COMPACT BY EXTRUSION FORMING

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

Abstract. The main problem at manufacturing products by deformation of waxy powder materials used to produce investment patterns is the lack of uniformity of physical-mechanical properties of the resulting compact, which results in an uneven elastic response of the compacted material. The results of experimental determination of the parameters of the process of obtaining an extended compact by extrusion forming are given in the paper. It is determined, that change of fractional composition of materials and velocity of movement of a punch can regulate final properties of extended compact for obtaining the predicted values of their elastic response. The solution variants of problem of elastic response are proposed on the basis of experimental data. Obtaining an extended compact element with the most uniform elastic response makes it possible to predict the accuracy and take into account its dimensional parameters in the design of the press equipment.

Keywords: loading, compact, mode of deformation, pressing, porosity, waxy materials, dimensional-geometric accuracy, elastic response, die block

REFERENCES

- [1]. Sushko T. I., Buchnev A. V., Turishchev V. V., Pashneva T. V. Modelirovanie processov zatverdevaniya krupnogabaritnoj stal'noj korpusnoj otlivki s sovershenstvovaniem tekhnologii izgotovleniya // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2010. T. 6. № 12. S. 44–47. (in Russian)
- [2]. Kul'bovskij I. K., Karelin S. V., Popov E. V., Turkin D. A. Komp'yuternoe modelirovanie processov zatverdevaniya i ohlazhdeniya massivnyh otlivok iz chuguna v litejnoj forme // Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2008. № 2. S. 23–26. (in Russian)
- [3]. Nazaratin V. V. Tekhnologiya izgotovleniya stal'nyh otlivok otvetstvennogo naznacheniya. M.: Mashinostroenie, 2006. 234 s. (in Russian)
- [4]. Sadova A. N., Deberdeev T. R., Kuznecova O. N., Stoyanov O. V. Problemy vyavleniya i ustraneniya vozmozhnyh defektov v processe polucheniya izdelij iz termoplastov: uchebnoe posobie. Kazan' : Izd-vo Kazan. gos. tekhnol. un-ta, 2009. 123 s. (in Russian)
- [5]. YUdin S. B., Levin M. M., Rozenfel'd S. E. Centrobezhnoe lit'e. M., «Mashinostroenie», 1972. 280 s. (in Russian)
- [6]. Zhilin S. G., Komarov O. N., Sosnin A. A., Bogdanova N. A. Vliyanie uprugogo otklika na razmerno-geometricheskie harakteristiki protyazhennoj pressovki,

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

poluchennoj iz voskoobraznogo materiala mundshtuchnym vydavlivaniem // Vestnik PNIPU. Mashinostroenie. Metallurgiya. 2018. T.20. №2. S. 27–34. (in Russian)

[7]. ZHilin S. G., Komarov O. N., Sosnin A. A., Predein V. V. Poluchenie lit'ya povyshennoj razmernoj tochnosti po kombinirovannym litejnym modelyam iz alyumotermitnyh i voskoobraznyh smesej // Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii. 2016. №11. S. 6–11. (in Russian)

[8]. Garanin V. F., Ivanov V. N., Kazennov S. A. i dr. Lit'e po vyplavlyaemym modelyam /pod obshch. red. V.A. Ozerova. 4-e izd., pererab. i dop. M.: Mashinostroenie, 1994. 448 s. (in Russian)

[9]. ZHilin S. G., Komarov O. N., Sosnin A. A. Panchenko G. L. Sposob izgotovleniya vyplavlyaemyh modelej. Patent RF № 2632051 Sposob izgotovleniya vyplavlyaemyh modelej / Zayavl. 13.05.2016; Opubl. 02.10.2017. Byul. №28. (in Russian)

[10]. ZHilin S. G., Komarov O. N., Potyanihin D. A., Sosnin A. A. EHksperimental'noe opredelenie parametrov regressionnoj zavisimosti Kol'rausha dlya poristyh pressovok iz voskoobraznyh poroshkovyh kompozicij //Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii. 2018. Vyp. 2. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-2-1732>. (in Russian)