

Е. Е. Абашкин, Н. А. Богданова, С. Г. Жилин, О. Н. Комаров, В. В. Предеин

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЭТАПОВ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОТЛИВКИ ВЫСОКОЙ РАЗМЕРНО-ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ

*Хабаровский Федеральный исследовательский центр ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре,
Россия*

Аннотация. Изготовление биметаллических деталей позволяет реализовать в них комплекс эксплуатационных и механических характеристик, присущих железоуглеродистым и цветным сплавам. Реализация процесса разрабатываемой технологии формирования биметаллического литья с жестким стальным каркасом и поверхностью из цветных сплавов, обладающих большими, чем материал каркаса пластичностью и электропроводностью, возможна за счет применения модернизированного метода литья по выплавляемым моделям. Изменению подвергается стадия изготовления поверхности выплавляемой модели отливки, которая формируется запрессовкой воскообразного порошка в зазор между пресс-формой и стальным каркасом, что позволяет повысить размерно-геометрическую точность литья за счет устранения теплофизических дефектов. Проблемой в реализации такого подхода является упругий отклик материала. В работе решается задача определения технологических параметров формирования воскообразной поверхности выплавляемой модели биметаллической отливки.

Ключевые слова: биметаллическая отливка, моделирование процесса, деформация, напряжение, экструзия, воскообразные материалы, температурные дефекты, выплавляемая модель, прессование, размерно-геометрическая точность

DOI: 10.37972/chgpu.2020.14.82.032

УДК: 621.74.045 / 046

Введение

Значительное количество технологических операций, сопровождающий процессы получения заготовок деталей сложной пространственной конфигурации определили необходимость разработки и совершенствования методов литья, позволяющих минимизировать припуски на механическую обработку. Наиболее востребованным способом формирования литых заготовок является метод литья по выплавляемым моделям, традиционная последовательность операций в котором сводится к изготовлению блоков с выплавляемыми моделями и элементами литниково-питающей системы, послойному формированию на таких блоках и сушке керамических оболочковых форм, выплавлению материала блоков из форм, прокаливанию и заливке их расплавом металла. Из производственной практики известно, что тепловые процессы, сопровождающие технологические этапы получения таких заготовок, в значительной степени определяют появление дефектов в виде усадки модельной массы, образования трещин в керамике при выплавлении из нее модельного материала. Повышению качества поверхности выплавляемых моделей посвящено значительное количество работ российских и зарубежных исследователей, которые преимущественно сводятся к изменению свойств модельных материалов путем внесения в их состав наполнителей [1–3]. Однако изменение свойств модельных материалов не позволяет в полной мере устранить образование тепловых дефектов. Решение проблемы видится не только в формировании пористости в структуре выплавляемых моделей, позволяющей повысить трещиностойкость керамики на этапе удаления из нее модельной массы [4], но и в получении качественной поверхности, не имеющей усадочных дефектов. В этой связи перспективным представляется получение 6-12 %-ой пористости в структуре выплавляемой модели, формируемой прессованием порошков воскообразных составов, направленное на устранение тепловых дефектов в полном объеме [5]. При формировании выплавляемых моделей несложной конфигурации пористость в их структуре распределяется равномерно. Однако при формировании прессовок с протяженными

© Абашкин Е. Е., Богданова Н. А., Жилин С. Г., Комаров О. Н., Предеин В. В., 2020

Абашкин Евгений Евгеньевич

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

Богданова Нина Анатольевна

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

Жилин Сергей Геннадьевич

e-mail: sergeyzhilin1@rambler.ru, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия.

Комаров Олег Николаевич

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

Предеин Валерий Викторович

e-mail: predein3@mail.ru, научный сотрудник, Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ХФИЦ ДВО РАН

Поступила 20.03.2019

элементами или участками переменной толщины возникает неоднородность распределения свойств, приводящая к нарушению геометрии. Так, например, в ходе разработки процесса получения биметаллических отливок, определено, что формирование поверхности из воскообразных материалов на стальном каркасе, значения плотности различных участков модели могут отличаться. На рис.1 представлена схема последовательности получения биметаллической отливки, отличающаяся от традиционной схемы литья по выплавляемым моделям наличием этапа формирования поверхностного слоя выплавляемой модели путем запрессовки воскообразного модельного состава прессующими элементами в зазор между внутренней поверхностью пресс-формы и стальным каркасом [6]. Полученный блок затем облицовывают керамикой, сушат, выплавляют воскообразные компоненты, прокаливают и в зазор, образовавшийся между стальным каркасом и внутренней поверхностью керамической оболочки, подают расплав цветного металла с температурой ниже температуры плавления материала каркаса.

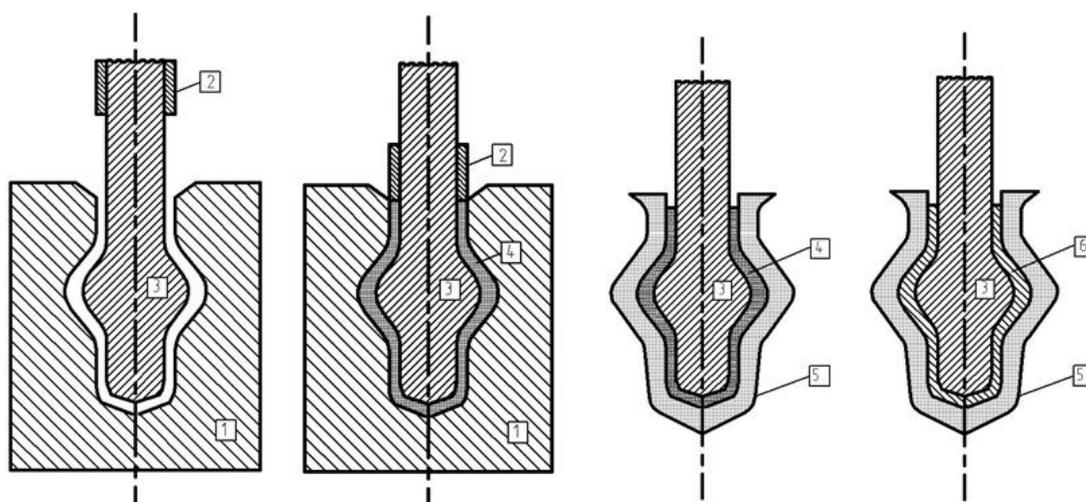


Рис. 1. Схема последовательности формирования биметаллической отливки: 1 – пресс-форма; 2 – подвижный пресс-пуансон; 3 – стальной каркас; 4 – воскообразный напрессованный слой; 5 – керамическая оболочка; 6 – биметаллическая отливка в оболочковой форме.

В ходе серии предварительных исследований установлено, что получение пористой структуры выплавляемых моделей достигаемой прессованием порошковых воскообразных композиций, представляется предпочтительным перед традиционными методами формирования выплавляемых моделей заливкой (либо запрессовкой) жидкой модельной массы в пресс-формы, так как позволяет повысить трещиностойкость оболочковых форм и размерную точность литья [7]. При этом диапазон пористости для различных модельных составов обусловлен их свойствами и определяется двумя факторами: коэффициентом термического расширения [8] и допустимой эксплуатационной прочностью [9]. Удовлетворительная эксплуатационная прочность выплавляемых моделей, получаемых прессованием порошков воскообразных материалов, на практике достигается в диапазоне значений пористости от 0 до 14 %. Последнее означает, например, что значение плотности пористой модели на 14 % ниже плотности характерной для состояния свободной заливки материала, из которого она сформирована.

В состоянии свободной заливки в материале присутствует рассредоточенный воздух, который может быть удален в результате внешнего механического воздействия. Так, например, при изостатическом уплотнении плотность парафина марки Т1 удалось увеличить с 0,86 г/см³ до 0,915 кг/м³ [10]. В результате роста нагрузки до определенного момента, соответствующего началу пластификации материала при мундштучной экструзии через диффузор, плотность формируемого протяженного изделия превышает плотность материала, получаемую при свободной заливке. Вследствие такого переуплотнения неизбежна разгрузка напряжения в формируемом теле, выражающееся в упругом отклике материала и, в конечном итоге, искажении геометрии прессовки. Искажения геометрии прессовки возникают также в условиях, когда отношение площади диффузора к площади пресс-пуансона значительное, а скорость перемещения пресс-пуансона и, соответственно, скорости экструзии, высокие, то возникают условия роста температуры в материале, поступающем в диффузор, что приводит к оплавлению периферийных участков прессовки и появлению тепловых дефектов в виде усадки. В этой связи рациональный выбор условий, при которых достигаются прогнозируемые значения размеров прессовки, сводится к балансу между скоростью экструзии и отношением площади диффузора к площади пресс-пуансона. В нашем случае скорость перемещения пресс-пуансона предварительно определена экспериментально и, как отмечено выше, составила 0,5 мм/с. Таким образом, для нашего случая остается определить требуемый диапазон соотношений площадей диффузора и пресс-пуансона, при которых плотность длинномерной прессовки, имитирующей формирование поверхности модели биметаллической отливки, будет ниже плотности материала, характерной для литого состояния.

Цели и задачи

Целью работы является экспериментальное моделирование технологических этапов процесса формирования тонкостенной поверхности вылавляемой модели биметаллической отливки высокой размерно-геометрической точности посредством определения условий мундштучного выдавливания (соотношения площадей внутреннего поперечного сечения цилиндрической пресс-матрицы и диффузора мундштука, силовых параметров выдавливания), при которых достигаются требуемые значения плотности протяженной прессовки из воскообразных материалов. В рамках представленной цели исследования решались следующие задачи: - определение влияния соотношения площадей внутреннего поперечного сечения пресс-матрицы и диффузора мундштука на силовые параметры процесса выдавливания; - исследование влияния соотношения площадей внутреннего поперечного сечения пресс-матрицы и диффузора мундштука на плотность протяженной цилиндрической прессовки из воскообразных модельных материалов.

Методы и подходы.

В качестве модельных использованы одно- и двухкомпонентные воскообразные материалы: парафин марки Т1 (ГОСТ 2368389. Парафины нефтяные твердые. Технические условия) и парафиностеариновый состав марки ПС 50/50, полученный сплавлением парафина марки Т1 со стеарином (ГОСТ 6484-96. Кислота стеариновая техническая. Технические условия). Таким образом, в эксперименте использованы Т1, как основной компонент состава ПС 50/50, так и сам состав, свойства которых позволяют их отнести к первой классификационной группе согласно [11, с.119]. Указанные материалы поставлены в виде пластин, полученных свободной заливкой в изложницы

размерами 150x400x500 мм. Воскообразный материал, получаемый свободной заливкой, имеет мелкодисперсную рассредоточенную пористость, с учетом которой плотность Т1 составляет 0,86 г/см³, а плотность ПС 50/50 0,934 г/см³ соответственно. Для реализации цели эксперимента воскообразные материалы подвергали измельчению и просеву на ситах, выполненных в соответствии ГОСТ 29234-91 «Пески формовочные. Метод определения среднего размера зерна и коэффициента однородности». По завершении просева материал представляет собой фракции от 0,63 до 2,5 мм хлопьевидной формы. Технологически обусловленный диапазон фракций материала, используемых в эксперименте, определен в результате предварительных исследований [7]. Установлено, что применение фракций модельного материала менее 0,63 мм увеличивает склонность к образованию комков, а при фракциях более 2,5 мм подача материала в различные участки пресс-форм сложной конфигурации затрудняется. На рис.2 представлена схема конструкции пресс-формы.

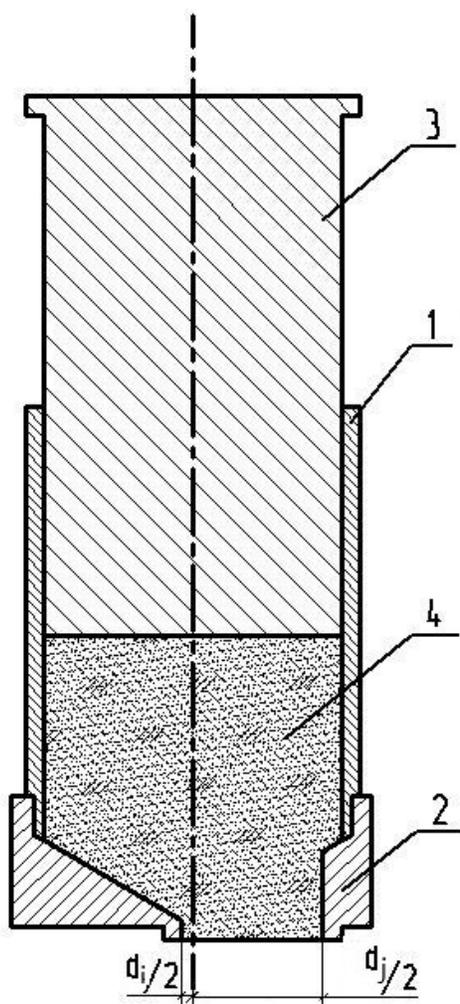


Рис. 2. Схема реализации эксперимента: 1 – пресс-матрица; 2 – мундштук с переменным диффузором; 3 – поршень пресс-матрицы; 4 – порошок воскообразного модельного состава.

В ходе эксперимента фракции материалов Т1 и ПС 50/50 (позиция 4) помещали в вертикально ориентированную цилиндрическую пресс-форму с внутренним диаметром $D = 45$ мм (позиция 1), в донной части которой расположен мундштук (позиция 2), выполненный в виде диффузора с конической внутренней поверхностью, угол наклона образующих которой равен 120° , что позволяет снизить величину нагрузки, необходимой для начала процесса экструзии [12, с.39]. Предварительными экспериментами определены требования к материалам пресс-форм, предназначенных для получения прессованных выплавляемых моделей. Так, например, использование сплавов на основе алюминия недопустимо вследствие адгезии уплотняемого воскообразного состава к поверхности пресс-формы, предположительно ввиду пластичности и низкой плотности алюминиевых сплавов. Применение стали 45 для выполнения элементов пресс-формы обеспечивает последней жесткость, позволяющую пренебречь значениями деформаций в ней, возникающих при экструзии воскообразного материала в ходе перемещения поршня (позиция 3) и уплотнения порошкового тела. В ходе эксперимента диаметр диффузора мундштука последовательно изменяли в сторону увеличения от $d_{i,j} = 0,006$ м с шагом $0,002$ м до диаметра, при котором завершается пластификация порошкового тела, характеризующегося отсутствием уплотнения материала и формированием прессованного цилиндрического тела. Масса дозировки воскообразного материала 4 в каждом эксперименте составляла $0,1$ кг. В ходе перемещения пресс-пуансона 3 с установленной предварительными экспериментами номинальной скоростью $0,5$ мм/с [5, 13] материал порошкового тела уплотняется и, по достижении им пластических свойств, выдавливается через диффузор 2. Сам процесс формирования длинномерной прессовки путем мундштучного выдавливания можно представить в виде трех последовательных этапов [14]: на первом, характеризующемся ростом значений нагрузки при одновременном перемещении пуансона 3, частицы материала 4 перераспределяются и уплотняются; на втором этапе, нагрузка достигает максимальных значений, при которых начинается экструзия материала; на третьем этапе нагрузка падает до значений, уровень которых остается неизменным до окончания процесса экструзии. Поддержка скоростного режима и регистрация силовых параметров экструзионного выдавливания осуществлялись при помощи универсальной испытательной машины AG-X plus Shimadzu, обеспечивающей отклонение значений нагрузки не более $0,03\%$ от задаваемого. Диаметры получаемых длинномерных прессовок определяли при помощи цифрового регистратора DIN 863 Vogel, обеспечивающего точность измерения $0,001$ мм.

Результаты и обсуждение.

Экспериментально получены зависимости нагрузки, возникающей на поршне пресс-матрицы в ходе перемещения вдоль вертикальной оси, определяющей пластификацию порошкового тела и последующую его экструзию, от отношения площади диффузора к площади сечения внутренней полости пресс-матрицы, представленные на рис.3. Для упрощения визуального восприятия результаты эксперимента представлены в виде различающихся по цветам кривых: синим цветом представлены зависимости, характерные для экструзии материала Т1, красным – для материала ПС 50/50 соответственно. Сплошными линиями представлены зависимости, характерные для экструзии материалов фракции $2,5$ мм, красным – для материалов фракции $0,63$ мм соответственно. Полиномиальные кривые, представленные на рис.3, характеризуются убыванием по экспоненте, а величина достоверности аппроксимации данных R^2 , в целом, значительно превышает $0,9$. Из графиков видно, что с увеличением значения

соотношения площадей диффузора и внутренней полости пресс-матрицы величина нагрузки, необходимой для начала процесса экструзии, снижается в диапазоне от 32 кН до 6 кН для материала Т1 и в диапазоне от 28 кН до 2 кН для материала ПС 50/50 соответственно. Такие различия в значениях нагрузки определяются большей пластичностью материала ПС 50/50 по сравнению с Т1. Общей тенденцией для всех задействованных в эксперименте материалов является более значительная величина нагрузки, возникающей при экструзии порошкового тела, состоящего из фракции 2,5 мм, чем при экструзии материала фракции 0,63 мм. По всей видимости, объяснение такого явления заложено в неравенстве площадей поверхности частиц различных фракции, выражающихся в конечном итоге в значениях насыпной плотности. Экспериментально определено, что для воскообразных материалов более высокая насыпная плотность, присуща порошковым телам, состоящим из частиц большей фракции. Так, например, для фракции 0,63 мм материала ПС 50/50 насыпная плотность составляет 310 кг/м³, а для фракции 2,5 мм того же материала значение насыпной плотности составляет 340 кг/м³.

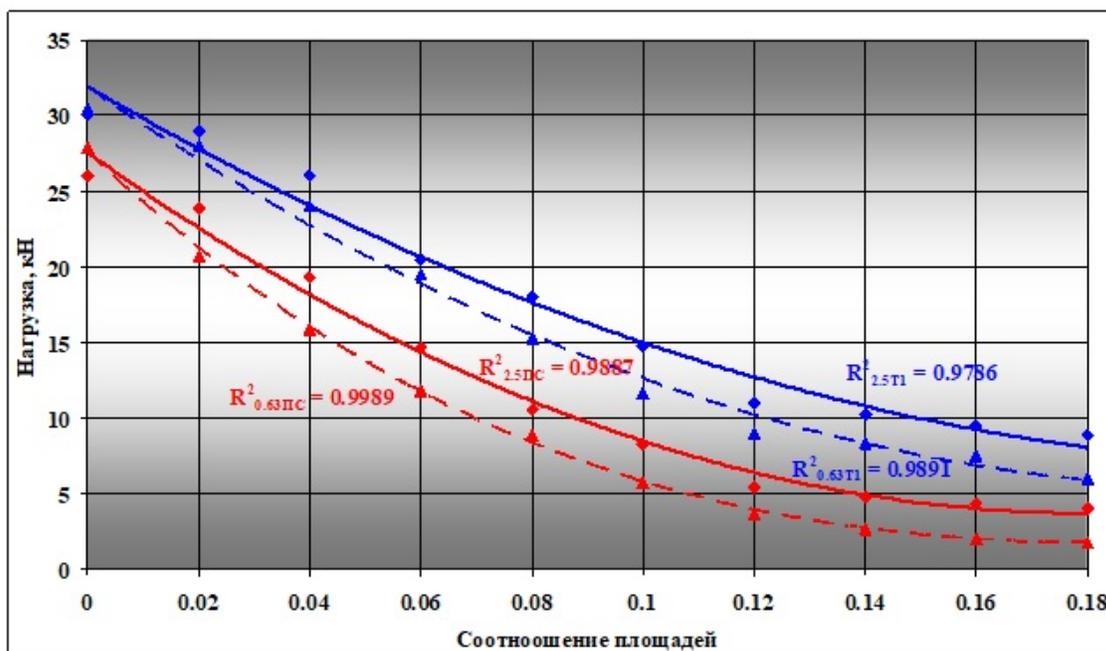


Рис. 3. Зависимость максимальной нагрузки от соотношения площадей внутреннего поперечного сечения цилиндрической пресс-матрицы и выходного отверстия диффузора.

В ходе эксперимента, результаты которого представлены на рис.3, определена верхняя граница диапазона значений величины соотношения площадей диффузора и внутренней полости цилиндра, при которых возможно создание условий для получения длинномерной пористой прессовки из воскообразных модельных композиций. Определение технологически приемлемого диапазона соотношения площадей диффузора и

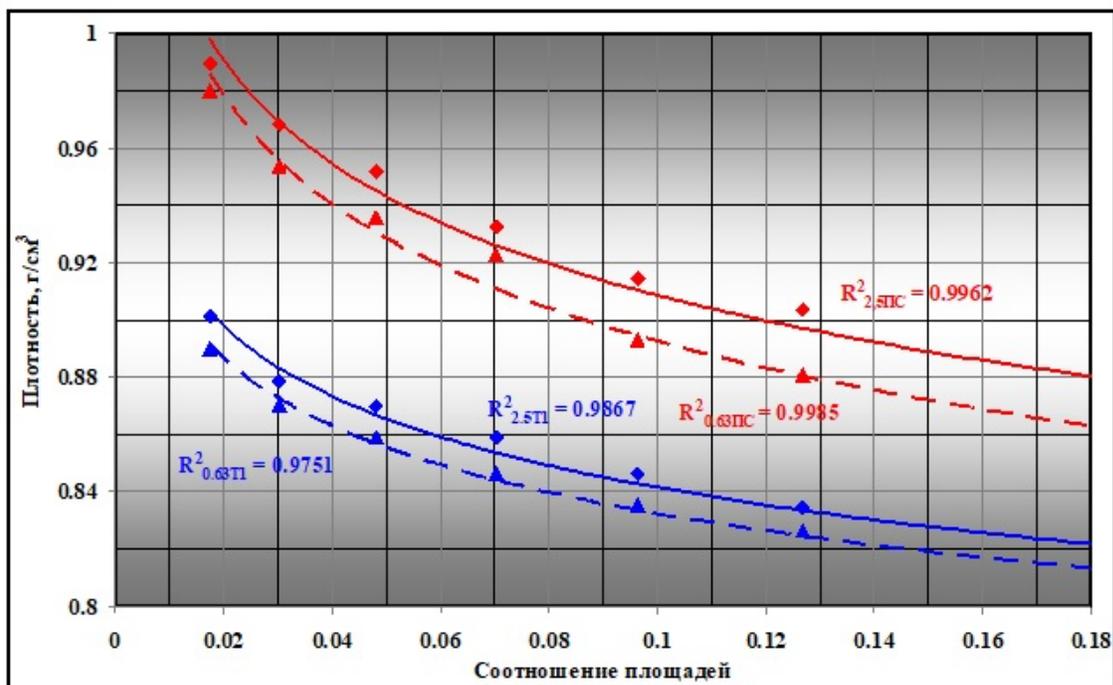


Рис. 4. Зависимость плотности длинномерных прессовок от соотношения площадей внутреннего поперечного сечения цилиндрической пресс-матрицы и выходного отверстия диффузора.

пресс-пуансона осуществлялось путем измерения плотности получаемых длинномерных прессовок. Результаты измерений представлены на рис.4 в виде экспоненциальных зависимостей значений плотности длинномерных прессовок из порошковых воскообразных материалов от соотношения площадей внутреннего поперечного сечения цилиндрической пресс-матрицы и выходного отверстия диффузора. Из графика видно, что данные, как и в случае с графиком на рис.3, позволили получить убывающие по экспоненте полиномиальные кривые, характеризующиеся величиной достоверности аппроксимации R^2 , значительно превышающей 0,9. Видно, что условия экструзии, возникающие при соотношении рассматриваемых в эксперименте площадей меньших 0,05, приводят к формированию переуплотненных прессовок. Это справедливо для всех материалов, задействованных в эксперименте. Для ПС50/50 значения плотности меньше, чем 0,934 г/см³ и для Т1 значения плотности меньше, чем 0,860 г/см³ достигаются при соотношении площадей больших, чем 0,05. Очевидно, что для всех рассмотренных в эксперименте материалов значения плотности длинномерных прессовок при увеличении диаметра выходного отверстия диффузора уменьшаются. При этом на конечную плотность прессовок, получаемых экструзией, определенное (но не решающее) влияние оказывает фракция материала: использование материала фракции 2,5 мм приводит к получению прессовки с плотностью на 1-2 % большей, чем у прессовок из фракции 0,63 мм. Увеличение соотношения площадей внутреннего поперечного сечения пресс-матрицы и выходного отверстия диффузора более 0,1 приводит к появлению дефектов на поверхности длинномерной прессовки.

Выводы

В результате эксперимента, моделирующего этапы процесса формирования тонкостенной поверхности выплавляемой модели биметаллической отливки высокой размерно-геометрической точности, определены условия мундштучного выдавливания, при которых на выходе из экструдера достигаются технологически приемлемые значения плотности протяженной прессовки из воскообразных материалов. Установлено, что при увеличении соотношения площадей поперечного сечения и диффузора мундштука значение максимальной нагрузки, необходимой для начала процесса мундштучного выдавливания, уменьшается, а более значительная величина нагрузки, возникает при экструзии порошкового тела, состоящего из более крупной фракции. Для всех воскообразных материалов, задействованных в эксперименте, установлены соотношения площадей внутреннего поперечного сечения цилиндрической пресс-матрицы и выходного отверстия диффузора, соответствующие диапазону значений $0,05 \div 0,1$, при соблюдении которого возможно формирование пористых прессовок с удовлетворительным качеством поверхности и плотностью меньшей, чем плотность этого материала, получаемая в результате свободной заливки.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Sabau A.S. V. S. Material properties for predicting wax pattern dimensions in investment casting // *Materials Science and Engineering: A*. 2003. no. T. 362. № 1-2. P. 125–134.
- [2] О.Г. Оспенникова. Исследование и разработка параметров технологического процесса изготовления моделей из модельных композиций на основе синтетических восков // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № № 3. С. 18–21.
- [3] Асланян И.Р. Гусева М.А. Оспенникова О.Г. Сравнительное исследование физико-механических и реологических характеристик модельных композиций // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2019. № № 6. С. 34–39.
- [4] Постижено В.К. Береговая О.С. Влияние процентного содержания воздуха на физико-механические характеристики модельного состава "Велен" // *Вестник Национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт"*. Серия: Машиностроение. 2011. № Т. 2. № 61. С. 67–71.
- [5] A.A. Sosnin N.A. Bogdanova S. Z., Komarov O. Finite Element Modeling of the Stress-Strain State of Waxy Compacts // *Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures (MRDMS-2019) AIP Conf. Proc.* 2019. no. 2176. P. 030017–1– 030017–4.
- [6] Богданова Н.А. Жилин С.Г. Комаров О.Н. Способ получения биметаллической отливки // Патент на изобретение RU 2696118 C1, 31.07.2019. Заявка № 2018140932 от 21.11.2018.
- [7] Жилин С.Г. Богданова Н.А. Комаров О.Н. Соснин А.А. Снижение упругого отклика при уплотнении порошковой парафиностеариновой композиции // *Деформация и разрушение материалов*. 2020. № № 1. С. 29–33.
- [8] Рассохина Л.И. Парфенович П.И. Нарский А.Р. Проблемы создания модельных композиций нового поколения на базе отечественных материалов для изготовления лопаток ГТД // *Новости материаловедения. Наука и техника*. 2015. № Т. 1. № 5. с. 7.
- [9] Салина М.В. Евстигнеев А.И. Влияние вакуумирования на физико-механические свойства и размерную точность выплавляемых моделей и отливок в литье по выплавляемым моделям // *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*. 2011. № Т. 1. № 5. С. 55–60.
- [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. № № 2 (74). с. 9.
- [11] В.Ф. Гаранин В.Н. Иванов С.А. Казеннов и др. под общ. ред. В.А. Озерова. *Литье по выплавляемым моделям*. Машиностроение: Москва, 1994. 448 с.
- [12] Жолобов В.В. Зверев Г.И. *Прессование металлов*. Металлургиздат: Москва, 1959. 543 с.

- [13] Жилин С.Г. Богданова Н.А. Комаров О.Н. Влияние гранулометрического состава и скорости выдавливания воскообразной композиции на геометрию длинномерной прессовки при мундштучном экструдировании // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2018. № № 4 (38). С. 54–64.
- [14] С.Г. Жилин. Влияние начальной упаковки компонентов порошкового тела на напряжённо-деформированное состояние прессовки при уплотнении // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2018. № Т. 1. № 3 (35). С. 73–79.

E.E. Abashkin, N.A. Bogdanova, S.G. Zhilin, O.N. Komarov, V.V. Predein

EXPERIMENTAL MODELING OF TECHNOLOGICAL STAGES OF THE FORMATION OF A HIGH DIMENSIONAL-GEOMETRIC BIMETALLIC CASTING

Khabarovsk Federal Research Center of the FEB RAS, Komsomolsk-na-Amure, Russia

Abstract. The production of bimetallic parts makes it possible to realize in them a set of operational and mechanical characteristics inherent in iron-carbon and non-ferrous alloys. The implementation of the process of the developed technology for the formation of bimetallic casting with a rigid steel frame and a surface made of non-ferrous alloys, which have greater plasticity and electrical conductivity than the frame material, is possible through the use of a modernized investment casting method. The stage of manufacturing the surface of the investment casting model, which is formed by pressing the wax powder into the gap between the mold and the steel frame, is subject to change, which makes it possible to increase the dimensional and geometric accuracy of casting by eliminating thermophysical defects. The problem in implementing this approach is the elastic response of the material. This work solves the problem of determining the technological parameters of the formation of the waxy surface of the melted model of a bimetallic casting.

Keywords: bimetallic casting, process modeling, deformation, stress, extrusion, waxy materials, temperature defects, investment casting, pressing, dimensional and geometric accuracy.

REFERENCES

- [1] Sabau A.S. V. S. Material properties for predicting wax pattern dimensions in investment casting // Materials Science and Engineering: A. 2003. no. T. 362. № 1-2. P. 125–134. (in English).
- [2] O.G. Ospennikova. Research and development of parameters of the technological process of manufacturing models from model compositions based on synthetic waxes // Aviation materials and technologies. 2014. № № 3. С. 18–21. (in Russian).
- [3] Aslanyan I.R. Guseva M.A. Ospennikova O.G. Comparative study of physical, mechanical and rheological characteristics of model compositions // All materials. Encyclopedic reference. 2019. № № 6. С. 34–39. (in Russian).

Abashkin Evgeniy Evgenevich, Junior Researcher. Khabarovsk Federal Research Center of the FEB RAS, Komsomolsk-na-Amure, Russia

Bogdanova Nina Anatolievna, Junior Researcher. Khabarovsk Federal Research Center of the FEB RAS, Komsomolsk-na-Amure, Russia

Zhilin Sergey Gennadevich, Ph. D. in Engineering sciences, associate professor, Leading Researcher. Khabarovsk Federal Research Center of the FEB RAS, Komsomolsk-na-Amure, Russia

Komarov Oleg Nikolaevitschh, Ph. D. in Engineering sciences, associate professor, Leading Researcher. Khabarovsk Federal Research Center of the FEB RAS, Komsomolsk-na-Amure, Russia

Predein Valeriy Viktorovich, Researcher. Khabarovsk Federal Research Center of the FEB RAS, Komsomolsk-na-Amure, Russia

- [4] Postizhenko V.K. Beregovaya O.S. Influence of the percentage of air on the physical and mechanical characteristics of the model composition "Velen-// Bulletin of the National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute". Series: Mechanical Engineering. 2011. № Т. 2. № 61. С. 67–71. (in Russian).
- [5] A.A. Sosnin N.A. Bogdanova S. Z., Komarov O. Finite Element Modeling of the Stress-Strain State of Waxy Compacts // Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures (MRDMS-2019)AIP Conf. Proc. 2019. no. 2176. P. 030017–1– 030017–4. (in English).
- [6] Bogdanova N.A. Zhilin S.G. Komarov O.N. Method of obtaining bimetallic casting // Patent for invention RU 2696118 C1, 07/31/2019. Application No. 2018140932 dated 21.11.2018. (in Russian).
- [7] Zhilin S.G. Bogdanova N.A. Komarov O.N. Sosnin A.A. Decrease in elastic response during compaction of powder paraffin-stearin composition // Deformation and destruction of materials. 2020. № № 1. С. 29–33. (in Russian).
- [8] Rassokhina L.I. Parfenovich P.I. Narskiy A.R. Problems of creating model compositions of a new generation on the basis of domestic materials for the manufacture of GTE blades // News of Material Science. Science and technology. 2015. № Т. 1. № 5. с. 7. (in Russian).
- [9] Salina M.V. Evstigneev A.I. Influence of vacuumization on physical and mechanical properties and dimensional accuracy of lost-wax models and castings in investment casting // Uchenye zapiski Komsomolsk-on-Amur State Technical University. 2011. № Т.1, № 5. С. 55–60. (in Russian).
- [10] Zhilin S.G. Komarov O.N. Potyanikhin D.A. Sosnin A.A. Experimental determination of the parameters of the Kohlrausch regression dependence for porous compacts from wax-like powder compositions // Engineering journal: science and innovations. 2018. № № 2 (74). с. 9.
- [11] V.F. Garanin V.N. Ivanov S.A. Kazennov, others; under total. ed. V.A. Ozerov. Casting on investment models. Mashinostroenie: Moscow, 1994. 448 с. (in Russian).
- [12] Zholobov V.V. Zverev G.I. Metal pressing. Metallurgizdat: Moscow, 1959. 543 с. (in Russian).
- [13] Zhilin S.G. Bogdanova N.A. Komarov O.N. Influence of granulometric composition and speed of extrusion of a wax-like composition on the geometry of long pressing during die extrusion // Bulletin of the Chuvash State Pedagogical University named after I.I. AND I. Yakovleva. Series: Limit State Mechanics. 2018. № № 4 (38). С. 54–64. (in Russian).
- [14] S.G. Zhilin. Influence of the initial packing of the components of the powder body on the stress-strain state of the pressing during compaction // Uchenye zapiski Komsomolsk-on-Amur State Technical University. 2018. № Т. 1. № 3 (35). С. 73–79. (in Russian).