

УДК 621.74.045

*К.А. Власова¹, Т.Д. Ключкина¹, А.А. Леонов¹, С.А. Ларионов¹***ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МОДЕЛЬНЫХ СОСТАВОВ
С ПЛАСТИКОВОЙ ОСНАСТКОЙ, ИЗГОТОВЛЕННОЙ
С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПЕЧАТИ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-2-7-7

Рассмотрено взаимодействие модельного состава и пластиковой оснастки. Проведен эксперимент, для которого подобраны три модельных состава, разные по составу и свойствам, на примере тонкостенной фасонной отливки детали «Кронштейн», изготавливаемой литьем по выплавляемым моделям. Выявлены отличия склонности модельных составов к образованию усадочных раковин. Проведен сравнительный анализ результатов эксперимента. По результатам эксперимента подобран оптимальный модельный состав для изготовления модели отливки «Кронштейн».

Ключевые слова: модельный состав, ABS пластик, усадочная раковина, литье по выплавляемым моделям, воск, разделительное покрытие.

*К.А. Vlasova¹, T.D. Klyukvina¹, A.A. Leonov¹, S.A. Larionov¹***INTERACTION OF MODEL COMPOSITIONS
WITH PLASTIC EQUIPMENT MADE
USING 3D PRINTING TECHNOLOGY**

This article discusses the interaction of the model composition and plastic equipment. An experiment was conducted with the participation of three model compositions, different in composition and properties, using the example of a thin-walled shaped casting of «Kronstejn» component, manufactured by investment casting. Differences in the tendency of model compositions to form shrinkage shells were revealed. A comparative analysis of the experimental results was carried out. Based on the results of the experiment, the optimal model composition for the production of «Kronstein» casting model was selected.

Keywords: model composition, ABS plastic, shrinkable shell, investment casting, wax, separation coating.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

С развитием машиностроения возникла потребность в производстве большого количества точных однотипных отливок, которые стали формировать с помощью моделей и разъемных опок в песчано-глинистые формы. Во второй половине XIX в. этот способ сделался основным при производстве машиностроительного литья. Эмпирический подход применялся как к подбору оптимальных составов формовочных смесей, так и к установлению физико-механических свойств отливки. Позже получили развитие и специальные методы литья, такие как литье по выплавляемым моделям, литье под давлением, центробежное литье и др. В настоящее время известно около 54 способов литья [1, 2].

Общепринятое определение «способ литья» пока не сформулировано, однако можно определять способы литья по классификационным признакам, число которых колеблется от пяти до десяти в разных источниках. Выделяют [2] шесть главных признаков:

- основа материала формы;
- природа связующего;
- тип оснастки;
- способ уплотнения;
- способ заливки;
- способ воздействия на жидкий расплав в процессе кристаллизации.

Каждый способ литья отличается от других хотя бы по одному из вышеприведенных классификационных признаков. В качестве основных рассматриваемых способов литья были выбраны литье по выплавляемым моделям (ЛВМ), литье в песчано-глинистые смеси (ПГС), а также литье в стержневые/холоднотвердеющие смеси (ХТС), технологические возможности которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительные характеристики способов литья

| Параметр | ЛВМ | ПГС | Литье в стержневые смеси |
|--|---|---|---|
| Сложность процесса | Процесс более многооперационный и сложный | ПГС, по сравнению с литьем в стержневые смеси, является более простым способом литья | |
| Относительная стоимость формовочных материалов | Связующие для ЛВМ приблизительно одинаковы по цене со связующим ХТС, однако пески для ЛВМ существенно дороже, что увеличивает стоимость процесса в разы | Смесь на основе синтетических связующих стоит дороже, чем на основе глины. Поэтому отливка, полученная литьем в стержни, будет стоить дороже, чем отливка, полученная литьем в ПГС | |
| Минимальная толщина получаемой стенки | В ряде случаев менее 1 мм | 3 мм | |
| Точность получаемого изделия | Точность получаемых отливок обычно IT9–IT10 (по ЕСДП). Шероховатость $R_z=20$ мкм | Точность получаемых отливок обычно IT16. Шероховатость $R_z=80$ мкм | Точность получаемых отливок обычно IT15. Шероховатость $R_z=40$ мкм |
| Сплавы, используемые в данном способе | Любые литейные сплавы, включая жаропрочные литейные сплавы | В основном в качестве материала отливок используются чугун, который обладает хорошей жидкотекучестью и малой усадкой, и малоуглеродистая сталь. Исключением составляют титан, жаропрочные материалы | |

Для проведения эксперимента выбран способ литья по выплавляемым моделям.

Литье по выплавляемым моделям (ЛВМ) – процесс изготовления отливок путем заливки расплавленного металла в форму, которая получена с использованием восковой модели [1]. Технология ЛВМ – сложный и трудоемкий процесс, обеспечивающий получение отливок, сложных по конфигурации, массой от нескольких граммов до десятков килограммов, с толщиной стенок от 0,5 мм, с поверхностью, соответствующей 4–6 классу чистоты, и с высокой точностью размеров по сравнению с другими способами литья [3]. Размеры отливок, полученных методом ЛВМ, максимально

приближены к размерам готовой детали. За счет сокращения механической обработки снижается стоимость готового изделия. Иными словами, при изготовлении отливок по такой технологии получают точное литье. Технология ЛВМ является самой распространенной для получения точного литья [4].

В литье по выплавляемым моделям точность отливок в основном определяется параметрами их изначальной выплавляемой модели. В свою очередь, точность любой выплавляемой модели зависит от свойств используемого модельного состава, условий производства и хранения, конфигурационных особенностей выплавляемых моделей и оснастки.

Модельные составы, используемые для выплавляемых моделей, как правило, имеют четко выраженную температуру ликвидус (начала кристаллизации раствора) и солидус (температуру исчезновения последних частей жидкой фазы), что указывает на их кристаллическое строение в твердом состоянии.

В интервале кристаллизации модельный состав имеет большую подвижность, пластичность при определенной прочности и твердости (так называемый интервал пластичности) и, главное, обладает свойством тиксотропии.

При этом модельный состав должен обладать следующими свойствами:

- быть однородным;
- иметь минимальные усадку (при охлаждении) и расширение (при нагревании и выплавлении);
- малую зольность;
- достаточную жидкотекучесть в вязкоподвижном или пастообразном состоянии;
- температуру размягчения $>40^{\circ}\text{C}$, плавления $50\text{--}90^{\circ}\text{C}$;
- высокую теплопроводность;
- не прилипать и не взаимодействовать с формами;
- хорошо паяться;
- быть экологически чистым и безвредным как в исходном состоянии, так и при выплавлении (вытопке) и прокатке форм.

В восковые модельные составы могут входить как кристаллические, так и аморфные компоненты, каждый из которых характеризуется своим массово-молекулярным распределением. Поэтому воски плавятся в очень широком температурном диапазоне, а не при одной определенной температуре.

Основными недостатками парафиностеариновых модельных составов являются значительная объемная и линейная усадка, высокий коэффициент объемного расширения при нагревании, низкая прочность и твердость. Как результат: тепловое расширение модельной композиции опережает ее расплавление, что в дальнейшем при литье металла ведет к образованию трещин в форме. Именно поэтому особое внимание при выборе модельного состава необходимо обратить на его усадку.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 10.10. «Энергоэффективные, ресурсосберегающие и аддитивные технологии изготовления деформированных полуфабрикатов и фасонных отливок из магниевых и алюминиевых сплавов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [5].

Материалы и методы

Задача данного исследования – на примере детали «Кронштейн» (рис. 1) сравнить усадку нескольких модельных составов. Необходимо было также подобрать наиболее подходящий модельный состав для изготовления выбранной детали с учетом

материала оснастки. Деталь «Кронштейн» впоследствии будет изготавливаться способом литья по выплавляемым моделям в керамические формы из сплава АК7ч. [6, 7]. Изготовление детали ориентировано на мелкосерийное производство.



Рис. 1. Восковая модель детали «Кронштейн»

Особенностью детали является ее тонкостенность, при этом имеется два тепловых узла, которые требуют более интенсивного охлаждения для достижения равномерного распределения температур перед извлечением восковой модели из пластиковой оснастки.

Для отливки детали «Кронштейн» изготавливали пластиковую модельную оснастку с помощью технологии 3D-печати ABS пластика [8, 9]. Данный метод представляет собой технологию послойного создания трехмерного объекта путем укладки расплавленной нити пластика. Использование ABS пластика обусловлено его хорошими механическими свойствами, а также низкой стоимостью. Данный тип пластика выдерживает температуры в диапазоне от 90 до 110°C. Детали ABS пластика легко окрашиваются, что позволяет наносить защитные, разделительные и другие покрытия. Основным недостатком ABS пластика является его значительная объемная усадка в процессе охлаждения – материал может потерять до 0,8% объема [10], что в свою очередь может привести к деформации моделей и даже их растрескиванию. Для того чтобы избежать данного явления, при печати модельной оснастки использовали подогреваемые рабочие платформы, которые снижают градиент температур между нижними и верхними слоями детали. Полное охлаждение каждой детали оснастки производилось после окончания печати.

Полезным свойством ABS пластика является его растворимость в ацетоне. Некоторые детали оснастки, которые сложно напечатать без поддержек, изготавливали из двух частей, которые впоследствии склеивали с помощью ацетона.

Форма, используемая для изготовления восковой модели детали «Кронштейн», представлена в разборном виде на рис. 2. Оснастка состоит из элементов, формирующих внутреннюю полость, и кожуха. Следует отметить, что структура материала модельной оснастки является ячеистой [10], в связи с чем возникают сложности с равномерным охлаждением модельного состава в пластиковой форме: массивные элементы в теле модели не успевают затвердевать, в то время как тонкие элементы приобретают прочность. При дальнейшем охлаждении тонкие элементы становятся хрупкими, что приводит к повреждению восковой модели при извлечении из формы.

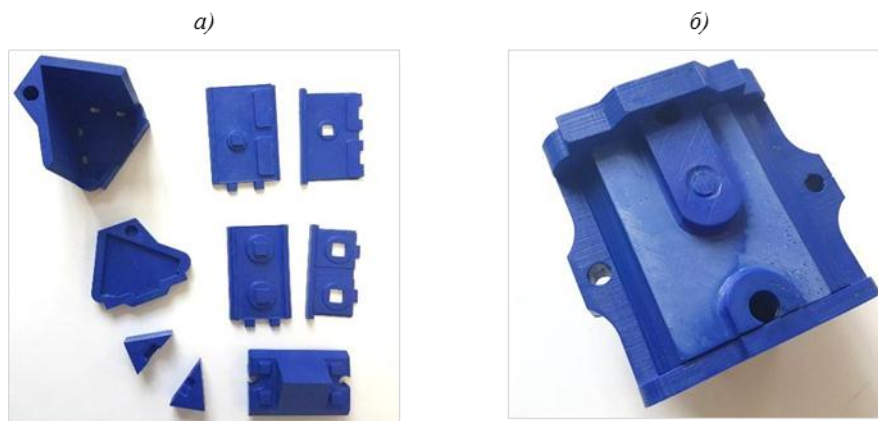


Рис. 2. Пластиковая форма для изготовления детали «Кронштейн» в разобранном (а) и собранном виде (б)

В настоящее время известно более 400 составов модельной массы. Свойства этих составов в значительной степени определяются технологическими процессами литья и применяемым оборудованием. Качество модели во многом определяет качество отливки, поэтому следует ответственно подходить к выбору модельного состава [12, 13].

Согласно работе [12], модельные составы разделяют на 7 групп.

1. Воскообразные составы – являются наиболее распространенными; основными составляющими являются парафин, стеарин, церезин, воски (буроугольный или горный, торфяной), сложные эфиры высших кислот, например, марки ПС50-50, ПСЭ 70-25-5, ПВ200.

2. Составы, в основе которых натуральные синтетические смолы, термопласты, в качестве добавок в них используют воскообразные материалы (парафин, церезин), например, марок КПсЦ 50-30-20, КЦПсБн 80-18-1,6-0,4.

3. Водорастворимые составы – на основе карбамида, азотных и азотнокислых солей щелочных металлов, гидратированных сернокислых солей, например, марок КББк 98-2, КБНк 80-20, НкНн 55-45.

4. Термопласты, например, марки ПСВ-ЛД (вспенивающийся полистирол).

5. Легкоплавкие металлы и сплавы [14] – в промышленности применяют ртуть, заливаемую посредством свободной заливки при нормальных условиях и замораживаемую в ацетоне при температуре -60°C .

6. Механические смеси или смесь составов – например, групп 3 и 1.

7. Составы с твердыми наполнителями – основу составляют модельные составы группы 1 с добавками порошков – например, тугоплавких восков.

Для исследования склонности модельных составов к образованию усадочных раковин выбраны следующие марки:

- ПС50-50 (группа 1);
- Green Verde фирмы Castaldo (группа 2);
- использованный ранее (отработанный) модельный состав фирмы Freeman в процентном соотношении с парафином 70:30 (группа 2).

Склонность к образованию усадочных раковин на деталях «Кронштейн» определяли по величине линейной усадки при охлаждении модельного состава в форме. В качестве критерия склонности модельного состава к образованию усадки принята глубина усадочной раковины, образующейся в питателях, при затвердевании модельного состава (рис. 3). Величина усадки определяется с помощью штангенциркуля на разрезанных вдоль оси образцах.



Рис. 3. Место отбора образцов из детали «Кронштейн»

Для уменьшения трения между модельным составом и ABS пластиком на формообразующую поверхность оснастки следует наносить разделительное покрытие. В ходе исследования опробованы следующие разделительные покрытия: силиконовая смазка; касторовое масло; льняное масло; грунтовка для пластмасс; тонкий слой заливаемого модельного состава.

Для изготовления образцов формообразующие поверхности оснастки смазывают разделительным покрытием [15, 16]. В результате сравнительного анализа подобран наиболее оптимальный смазочный материал – льняное масло. Данное покрытие способствует уменьшению трения между модельным составом и материалом оснастки, уменьшает его прилипаемость.

В подготовленную форму заливали исследуемые модельные составы при температуре 50–89°C. После затвердевания модели извлекали из формы и дальнейшее охлаждение моделей проходило на воздухе.

При проведении экспериментов соблюдали следующие условия:

- исследуемые модельные составы заливали в «рабочем» интервале температур, принятом для каждого модельного состава;
- температура в помещении, в котором проводились испытания, а также начальная температура формы должны быть $23 \pm 2^\circ\text{C}$;
- заливку модельного состава в оснастку проводили с интервалом не менее 15 мин – для полного охлаждения формы перед следующей заливкой.

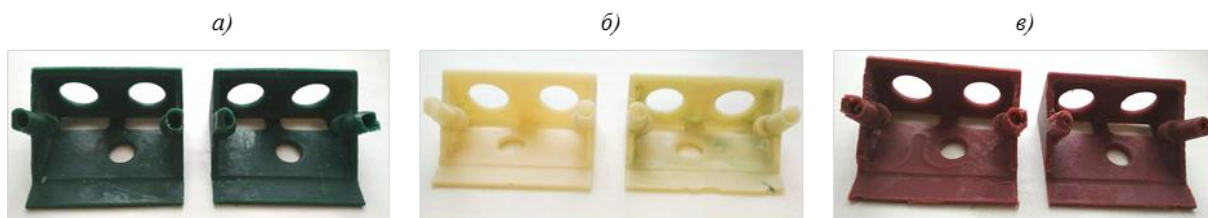


Рис. 4. Отлитые образцы детали «Кронштейн»

После охлаждения моделей на воздухе (не менее 2 ч) визуально оценивали качество их поверхности и отбирали образцы, пригодные для проведения измерений (рис. 4). К измерению допускали модели с гладкой поверхностью, не имеющие спаев, трещин и раковин на поверхности.

Результаты

Для проведения измерения глубины усадочной раковины в образцах, отливку извлекают из оснастки и оценивают визуально на наличие дефектов.

Выбраны три модельных состава, наиболее часто применяемые в литье по выплавляемым моделям, – ПС50-50, Green Verde фирмы Castaldo и отработанный модельный состав фирмы Freeman в процентном соотношении с парафином 70:30. Выбранный состав разогревали на электрической варочной панели в металлической емкости. Заливку в форму производили с помощью мерного стакана (температуры заливки модельного состава – см. в табл. 2). После заполнения формы одним из составов образцы выдерживали в форме до полного затвердевания. Для измерения глубины усадочной раковины образцы разрезали вдоль оси (рис. 5). Результаты эксперимента представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты эксперимента

| Модельный состав | Температура заливки, °С | Глубина усадочной раковины, мм |
|--|-------------------------|--------------------------------|
| ПС50-50 | 50±2 | 3,5 |
| Green Verde фирмы Castaldo | 89±3 | 0,8 |
| Отработанный модельный состав фирмы Freeman в процентном соотношении с парафином 70:30 | 80±2 | 1,2 |



Рис. 5. Разрезанный образец из модельного состава Green Verde фирмы Castaldo

Графическое представление результатов экспериментов показано на диаграмме (рис. 6).

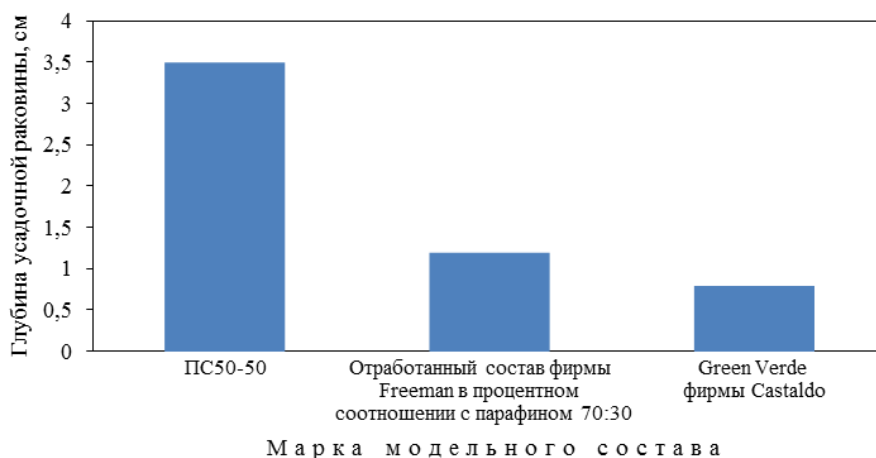


Рис. 6. Диаграмма результатов эксперимента с применением модельных составов

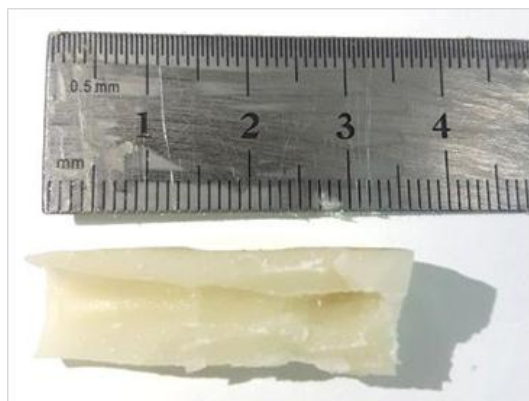


Рис. 7. Образец со сквозным отверстием

Вследствие хрупкости модельного состава ПС50-50 не удалось разрезать образец, не повредив его, однако на рис. 7 видно, что образовавшаяся раковина – сквозная.

Заключения

Наибольшей склонностью к усадке обладает модельный состав ПС50-50 (рис. 7), наименьшей – модельный состав марки Green Verde фирмы Castaldo.

По результатам сравнительного анализа выбранных модельных составов выявлено следующее:

1. При заливке модельного состава ПС50-50 температура в восковой модели распределяется неравномерно таким образом, что по истечении времени затвердевания модельного состава часть модели становится хрупкой настолько, что извлечь модель из формы, не повреждая ее, не представляется возможным. Для дальнейших исследований рекомендуется производить заполнение формы под давлением при более низкой температуре.

2. При заливке формы отработанным модельным составом фирмы Freeman плоские поверхности модели коробит по причине усадки модельного состава (рис. 4, в).

На внутренних углах модели также образуются усадочные раковины. Получаемые восковые модели могут быть восстановлены (запайка дефектов), однако это дополнительная операция, увеличивающая время изготовления блока моделей.

3. При использовании модельного состава Green Verde фирмы Castaldo модели получаются с гладкой поверхностью и минимальным количеством дефектов. Восстанавливать модель требуется только в том случае, если на ее поверхности появляются пузырьки воздуха, замешанные при заливке модельного состава.

В связи с вышеприведенными данными наиболее подходящим модельным составом для восковой модели детали «Кронштейн» является модельный состав Green Verde фирмы Castaldo.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов В.Н., Казеннов С.А., Курчман Б.С. и др. Литье по выплавляемым моделям. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1984. 408 с.
2. Трухов А.П., Сорокин А.Ю., Ершов М.Ю. и др. Технология литейного производства: Литье в песчаные формы: учеб. М.: Академия, 2005. 528 с.
3. Иванов В.Н. Словарь-справочник по литейному производству. М.: Машиностроение, 1990. 384 с.
4. Металлы и сплавы: справочник / под ред. Ю.П. Солнцева. СПб.: Профессионал, Мир и семья, 2003. 1066 с.

5. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
6. Дуюнова В.А., Волкова Е.Ф., Уридия З.П., Трапезников А.В. Динамика развития магниевых и литейных алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 225–241. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-225-241.
7. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // *Все материалы*. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
8. Каблов Е.Н. Аддитивные технологии – доминанта национальной технологической инициативы // *Интеллект и технологии*. 2015. №2 (11). С. 52–55.
9. Петрова Г.Н., Сапего Ю.А., Ларионов С.А., Платонов М.М., Лаптев А.Б. Пожаробезопасные термопластичные материалы для 3D-технологии // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2017. №9. Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.01.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-9-7-7.
10. Петрова Г.Н., Ларионов С.А., Сапего Ю.А., Платонов М.М. Реологические свойства термопластичной композиции на основе поликарбоната: зависимость от температуры переработки; влияние на механические характеристики и размерную стабильность объектов, созданных по FDM-технологии // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2017. №4. Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.01.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-4-9-9.
11. Лакедемонский А.В., Кваша Ф.С., Менделеев Я.И. и др. Литейные дефекты и способы их устранения. М.: Машиностроение, 1972. 152 с.
12. Озеров В.А., Гаранин В.Ф. Литье повышенной точности по разовым моделям: учеб. пособие. М.: Высшая школа, 1988. 87 с.
13. Петрова Г.Н., Ларионов С.А., Платонов М.М., Перфилова Д.Н. Термопластичные материалы нового поколения для авиации // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 420–436. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-420-436.
14. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // *Металлы Евразии*. 2012. №3. С. 10–15.
15. Оспенникова О.Г. Исследование влияния наполнителей на свойства и стабильность модельных композиций, выбор оптимальных составов // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №3. С. 14–17. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-14-17.
16. Оспенникова О.Г. Исследование и разработка параметров технологического процесса изготовления моделей из модельных композиций на основе синтетических восков // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №3. С. 18–21. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-18-21.