

УДК 621.74.045

*С.И. Пентюхин¹, А.В. Трапезников¹, К.А. Власова¹, Т.Д. Клюквина¹***ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТЛИВОК ИЗ СПЛАВА АК7ч.
С ПРИМЕНЕНИЕМ КЕРАМИЧЕСКИХ ФОРМ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-25-32

Работа посвящена определению оптимальной технологии изготовления отливок из сплава АК7ч. (системы Al–Si) методом литья по выплавляемым моделям (ЛВМ). Приведены данные о возможностях способа ЛВМ. Представлены данные об основных требованиях, предъявляемых к керамической оболочке, а также о способе ее изготовления и нанесения. Проведен эксперимент по определению необходимого количества слоев керамической обмазки для алюминиевых отливок различной конфигурации. На основе анализа результатов работы выбрано оптимальное количество наносимых слоев для изготовления блоков моделей и метод формовки оболочек.

Ключевые слова: керамика, литье по выплавляемым моделям, прочность, оболочка, связующее, суспензия, алюминиевые сплавы.

*S.I. Pentyukhin¹, A.V. Trapeznikov¹, K.A. Vlasova¹, T.D. Klyukvina¹***DETERMINATION OF OPTIMAL MANUFACTURING TECHNOLOGY
OF CASTING ALLOY АК7ч. WITH USING OF CERAMIC MOLDS**

This work is devoted to the determination of the optimal technology for manufacturing castings from the АК7ч. alloy (Al–Si systems) by the method of investment casting. Data on the capabilities of the investment casting method are given. The data on the basic requirements for the ceramic shell, as well as the method of its production and application, are presented. An experiment was conducted to determine the required number of layers of ceramic coating for aluminum castings of various configurations. On the basis of the analysis of the results of the work, the optimal number of applied layers was chosen for the production of model blocks and the method of shell molding.

Keywords: ceramic molds, investment casting, strength, shell, binder, suspension, aluminum alloys.

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

Литье по выплавляемым моделям (ЛВМ) является одним из наиболее точных видов литья для получения отливок с высокой точностью и чистотой поверхности. Согласно работе [1], данным способом можно получать отливки с толщиной стенки <1 мм из любых литейных сплавов, включая жаропрочные. Точность получаемых отливок, как правило, по IT9–IT10, шероховатость $R_z=20$ мкм. Однако этот процесс получения отливок очень сложный, трудоемкий и дорогостоящий [2]. В связи с вышеизложенным перед началом изготовления отливок рассчитывают целесообразность получения отливок данным методом.

При применении метода ЛВМ особое внимание уделяют изготовлению керамических оболочек для блоков отливок [3]. В любой неметаллической литейной форме главную роль в процессе формирования отливки играет только небольшой, непосредственно прилегающий к поверхности отливки слой формы, называемый облицовочным. Второй, более крупный слой, называемый наполнительным, играет вспомогательную роль, которая сводится к поддержке облицовочного слоя и к его упрочнению [4].

В отличие от обычных форм, изготавливаемых из песчано-глинистых смесей с жидким стеклом, когда полость литейной формы получают в результате механического уплотнения формовочной смеси вокруг модели, при ЛВМ оболочку готовят без механического уплотнения формовочного материала.

Формовочная смесь для оболочки представляет собой жидкую сметанообразную суспензию, состоящую из связующего раствора и тонкозернистого пылевидного огнеупорного материала, находящегося во взвешенном состоянии [5].

Процесс изготовления оболочки состоит в следующем: на поверхность блока моделей (чаще всего окунанием) наносят сплошную тонкую пленку суспензии, которую немедленно обсыпают электрокорундом. Суспензия прилипает к поверхности моделей и точно воспроизводит их форму, а слой электрокорунда проникает в слой суспензии, смачивается ею и фиксирует суспензию на поверхности моделей в виде тонкого облицовочного слоя. Электрокорунд также создает скелет оболочки и утолщает ее. Создаваемая им шероховатая нерабочая поверхность оболочки способствует хорошему сцеплению последующего слоя суспензии с предыдущим [6]. На рис. 1 представлен пример оболочковой формы для блока отливок типа «Кронштейн», изготавливаемых из литейного алюминиевого сплава АК7ч.



Рис. 1. Керамическая форма блока отливок типа «Кронштейн»

Свеженанесенная оболочка практически не обладает прочностью. Она удерживается на поверхности модели только благодаря действию сил смачивания. Упрочнение оболочки происходит в процессе ее естественной сушки или химического отверждения. После того как на поверхности модели в результате повторения операций смачивания суспензией, обсыпки электрокорундом и сушки (или химического отверждения) образуется оболочка достаточной толщины, из нее удаляют восковые модели выплавлением, выжиганием или растворением модельного материала в зависимости от свойств последнего. Процесс изготовления оболочки заканчивается ее прокаливанием. Процесс прокаливания ведется для удаления из оболочки всех газотворных составляющих и нагрева ее для лучшего заполнения жидким металлом.

Для предотвращения разрушения оболочки ее заформовывают в опорный наполнитель, который способствует замедленному охлаждению оболочки.

Керамические оболочки должны обладать специфическими свойствами, а именно:

1. Оболочка должна точно воспроизводить все очертания модели и обеспечивать получение гладкой поверхности формы.

Необходимым условием является прилипание суспензии к поверхности модели. Благодаря прилипанию пленка суспензии точно воспроизводит форму модели и удерживается на ее поверхности. Высокая прилипаемость суспензии к модели способствует уменьшению шероховатости внутреннего слоя оболочковой формы и повышению чистоты и качества поверхности отливок.

2. Пылевидный материал и связующий раствор не должны вступать в такое химическое взаимодействие, при котором может происходить быстрая свертываемость связующего раствора в суспензии.

3. Оболочка должна иметь как можно меньший температурный коэффициент линейного расширения.

4. Форма должна обладать термохимической стойкостью по отношению к заливаемому металлу и его оксидам.

5. Оболочка формы также должна обладать газопроницаемостью для удаления из полости формы воздуха в процессе заливки металла.

6. Оболочка после затвердевания на модели должна обладать наибольшей прочностью.

7. После охлаждения оболочка должна легко разрушаться для упрощения процесса очистки отливок от материала формы [7].

Одно из главных требований к литейной керамике – прочность [8]. Прочность оболочки на различных стадиях ее изготовления неодинакова. В затвердевшей на поверхности модели сплошной оболочке, из-за расширения и усадки моделей, могут возникнуть напряжения растяжения, сжатия, изгиба, среза. Особенно большие напряжения могут возникнуть при выплавлении или выжигании моделей, когда расширение модельного состава достигает наибольшей величины [9].

Если напряжения достигнут предела прочности оболочки, она будет разрушена, появятся трещины. Трещины – наиболее частый дефект (рис. 2).



Рис. 2. Треснувшая при вытопке модельного состава оболочковая форма

После выплавления модели оболочку заформовывают в наполнитель. Эта операция связана с механическим воздействием на оболочку в виде ударов, давления наполнителя и др. Прочность оболочки должна быть достаточной, чтобы противостоять механическим воздействиям на нее в этот период [10].

При прокаливании оболочки в наполнителе нагревающийся снаружи и расширяющийся наполнительный слой оказывает дополнительное давление на оболочку. К этому может добавиться давление столба наполнительного слоя. Давление на оболочку в результате термического расширения наполнителя может оказаться настолько большим, что в оболочке возникнут трещины. Возможна деформация оболочки, если она не обладает достаточной жесткостью.

Во время и после заливки металла до образования прочной корки металл оказывает давление на оболочку изнутри и может разрушить ее [11].

Из условий службы оболочки в период от начала выплавления модели до конца затвердевания отливки следует, что оболочка должна обладать максимально возможной прочностью и жесткостью. Протекающий по каналам формы металл может размывать и истирать поверхность оболочки. Оболочка должна обладать поверхностной прочностью, чтобы противостоять размывающему воздействию металла [12].

В данной работе опытным путем исследуется зависимость прочности керамической оболочки, применяемой при литье по выплавляемым моделям, от количества нанесенных слоев и применения опорного наполнителя.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 8.4. «Высокопрочные коррозионностойкие свариваемые магниевые и литейные алюминиевые сплавы для изделий авиакосмической техники нового поколения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [13, 14].

Материалы и методы

Наибольшее затруднение при получении керамических форм без трещин встречается при заливке отливок из алюминиевых сплавов, поскольку формы приходится охлаждать с 950°C до более низкой температуры, так как свойства сплавов, отлитых в горячие формы, существенно снижаются [15, 16]. Заливка алюминиевых сплавов проводится в подогретые до необходимой температуры керамические формы. Данный процесс осуществим двумя способами:

– после прокаливания керамические формы остужают до температуры разлива сплавов;

– после прокаливания керамические формы остужают до комнатной температуры, затем подогревают до температуры разлива сплава.

В работе использовался второй способ заливки сплавов. Это обусловлено необходимостью значительного перемещения прокаленных керамических форм между производственными участками. При заливке металла в непрогретую до температуры разлива форму часто возникают трещины, вследствие чего на отливках образуется облой и засоры. Производили заливку двух кардинально отличающихся по своим массовым и габаритным характеристикам типов отливок:

– отливка типа «Кронштейн» размером 85×55×45 мм с массой 100 г (рис. 3, а);

– отливка типа «Корпус» размером 430×90×80 мм с массой 1000 г (рис. 3, б).

В качестве связующего для керамической формы использовали гидролизированный раствор этилсиликата-40, расчет количества основных компонентов для проведения гидролиза проводили из расчета содержания Al_2O_3 в гидролизате. В качестве керамической составляющей использовали электрокорунд, который прокаливали при температуре 950–1000°C не менее 4 ч.

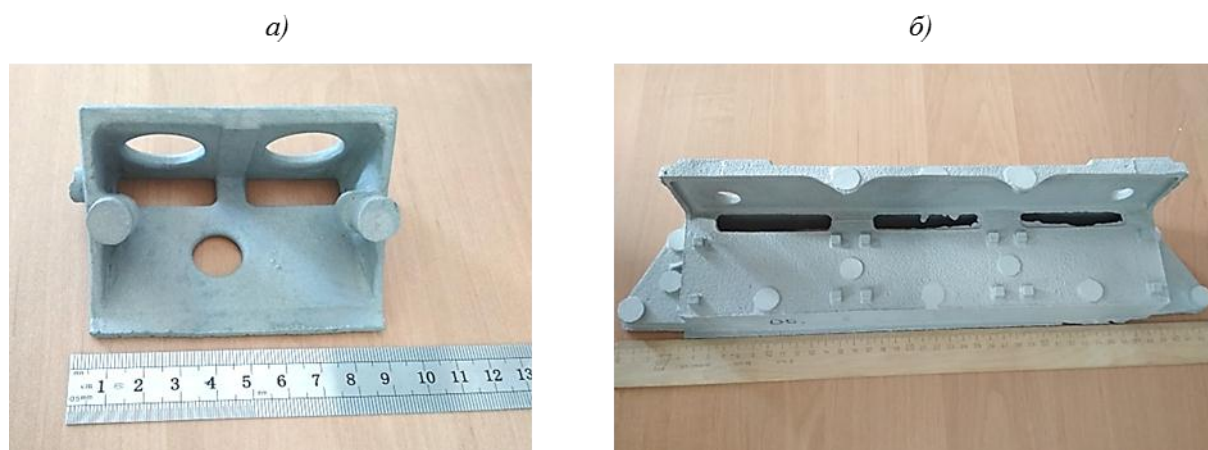


Рис. 3. Отливки типа «Кронштейн» (а) и «Корпус» (б) из литейного алюминиевого сплава АК7ч.

Керамическую суспензию перемешивали таким образом, чтобы наполнитель (электрокорунд) полностью находился во взвеси. Температура суспензии должна составлять 20–25°C. Условная вязкость суспензии должна находиться в пределах, указанных в таблице (в случае несоответствия этим значениям рабочую вязкость доводят до требуемой добавлением связующего или огнеупорного наполнителя).

Компоненты для создания керамической оболочки

Огнеупорный наполнитель	Количество огнеупорного наполнителя на 1 л связующего	Условная вязкость по ВЗ-4*			Обсыпка
		1-й слой	2-й слой	3-й и последующие слои	
Электрокорунд	2,5 кг	60–70	30–40	25–30	Электрокорунд

* Замер условной вязкости вискозиметром ВЗ-4 проводится по объему 100 мл.

Перед нанесением суспензии производят обезжиривание модельных блоков, затем наносят керамическую суспензию. Сушка керамического слоя производится воздушно-аммиачным способом с контролем влажности 60–70% и температурой в рабочем помещении 20–25°C. Удаление модельной композиции из керамических форм производится методом погружения их в емкость с кипящим модельным составом. Оставшийся после вытопки модельный состав удаляется из керамической формы при последующей прокалке. Прокалка проводится при рабочей температуре 950–1000°C не менее 4 ч.

Формовка при литье по выплавляемым моделям – это упаковка оболочек в опорный наполнитель до прокаливания их или перед заливкой металла. Известны следующие способы формовки: прокаливание и заливка оболочек без опорного наполнителя; формовка холодных (после выплавления моделей) оболочек, прокаливание и заливка их в наполнителе; прокаливание оболочек без наполнителя, формовка их в горячем наполнителе и заливка.

В работе при заливке металла в керамические формы в качестве опорного наполнителя использовали кварцевый песок.

Для отливок деталей типа «Кронштейн» и «Корпус» изготовлена пластиковая модельная оснастка с помощью FDM-технологии 3D-печати ABS-пластика. 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 – до 110°C. Основным недостатком ABS-пластика является его значительная объемная усадка в процессе охлаждения – материал может потерять до 0,8% объема. Это 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 производили после окончания печати.

Оснастка состоит из элементов, формирующих внутреннюю полость, и кожуха. Следует отметить, что структура материала модельной оснастки является ячеистой, 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. Для повышения выхода годного применяли пластичные модельные массы.

В качестве материала, заливаемого в изготовленные керамические формы, использовали литейный алюминиевый сплав АК7ч. (АЛ9). Данный сплав относится к герметичным сплавам системы Al–Si (силуминам). В отличие от сплавов типа твердого раствора (систем Al–Cu, Al–Mg, Al–Zn марок ВАЛ14, ВАЛ16 и ВАЛ12 соответственно) силумины обладают самой низкой горячеломкостью, что особенно актуально при литье в неподатливые и перегретые формы [17].

Сплав АК7ч. применяется в термообработанном состоянии по режиму Т6 (закалка и искусственное старение). Термическую обработку проводили в печах «Накал».

Результаты

При применении сухого опорного наполнителя (рис. 4) для литья в изготовленные керамические формы с 6–7 слоями обмазки, удалось обеспечить качество и бездефектность поверхности только отливок типа «Кронштейн».

При изготовлении формы с меньшим количеством слоев обмазки происходит ее растрескивание в местах наибольших напряжений (рис. 5).



Рис. 4. Оболочковые формы, заформованные в опорный наполнитель



Рис. 5. Треснувшая при заливке металла оболочковая форма с количеством слоев менее 6

Однако в связи с технологическими особенностями процесса заливки с применением опорного наполнителя, теплоотдача отливок значительно ухудшилась, что в свою очередь привело к существенному снижению механических свойств полученных сплавов, таких как предел прочности и относительное удлинение.

При изготовлении отливок типа «Корпус», имеющих большую поверхность, с применением опорного наполнителя необходимо применять не менее 8–9 слоев обмазки, толщина керамической формы при этом составляет от 6 до 8 мм. Однако ухудшение теплоотдачи отливок при применении данной технологии также привело к значительному ухудшению механических свойств.

Производство отливок типа «Кронштейн» и «Корпус» методом ЛВМ без применения опорного наполнителя позволило получить качественную бездефектную поверхность и требуемый уровень механических свойств. В ходе замеров геометрических параметров полученных отливок типа «Корпус» выяснилось, что в связи с особенностями их конфигурации (вытянутый силуэт и тонкостенность) возникает размерное отклонение от размеров, заданных в конструкторской документации. Готовая отливка требует дополнительной обработки в виде рихтовки (выравнивание стенок), что в свою очередь может привести к трещинам в отливке. Устранить этот дефект можно изменив оснастку на более жесткую пластиковую или металлическую. Вторым вариантом позволяет применить менее пластичные модельные массы, что повысит размерную точность.

В процессе проведенной работы установлено, что при подогреве оболочки с применением сухого опорного наполнителя для деталей типа «Корпус» происходит следующее: примыкающие к опоке наружные слои кварцевого песка нагреваются до температуры аморфных превращений (537°C) и расширяются раньше, чем прилегающие к оболочке слои песка и сама оболочка. Расширяющийся кварцевый песок, ограниченный стенками опоки, расширение которой невелико, давит на оболочку, что в некоторых случаях вызывает ее деформацию и разрушение. Создаваемое давление также может привести к выпучиванию опоки либо к образованию в ней трещин.

Заключения

По полученным в ходе работы данным можно сделать следующие выводы:

- для изготовления методом ЛВМ малогабаритных тонкостенных фасонных отливок типа «Кронштейн» из алюминиевых сплавов, 6–7-слойная керамическая форма обладает достаточной прочностью;
- для отливок типа корпус «Корпус», обладающих бóльшим размером, необходимо увеличение количества слоев керамической обмазки до 8–9;
- применение кварцевого песка в качестве опорного наполнителя для изготовления отливок из алюминиевых сплавов недопустимо, лучшим вариантом является подогрев оболочек и заливка их без опорного наполнителя либо применение наполнительных материалов, не имеющих полиморфных превращений как у песка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Власова К.А., Клюквина Т.Д., Леонов А.А., Ларионов С.А. Взаимодействие модельных составов с пластиковой оснасткой, изготовленной с помощью технологии 3D-печати // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2018. №2. Ст. 07. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 25.06.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-2-7-7.
2. Шкленник Я.И., Озеров В.А. Литье по выплавляемым моделям. Инженерная монография. М.: Машиностроение, 1984. 408 с.
3. Специальные способы литья: справочник / под общ. ред. В.А. Ефимова. М.: Машиностроение, 1991. 436 с.

4. Клюквина Т.Д., Власова К.А., Леонов А.А., Яшина С.А. Изучение механизма образования прочности в самоотвердеющих смесях с фенольным связующим (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2018. №3. Ст. 03. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 25.06.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-18-27.
5. Гаршин А.П., Гропянов В.М., Зайцев Г.П. Керамика для машиностроения. М.: Научтехлитиздат, 2003. 384 с.
6. Трухов А.П., Сорокин А.Ю., Ершов М.Ю. и др. Технология литейного производства: литье в песчаные формы: учеб. М.: Академия, 2005. 528 с.
7. Озеров В.А., Гаранин В.Ф. Литье повышенной точности по разовым моделям: учеб. пособие. М.: Высшая школа, 1988. 87 с.
8. 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.
9. 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.
10. Иванов В.Н. Словарь-справочник по литейному производству. М.: Машиностроение, 1990. 384 с.
11. Лакедемонский А.В., Кваша Ф.С., Менделеев Я.И. и др. Литейные дефекты и способы их устранения. М.: Машиностроение, 1972. 152 с.
12. Михеев С.В., Строганов Г.Б., Ромашин А.Г. Керамические и композиционные материалы в авиационной технике. М.: Альтекс, 2002. 276 с.
13. 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.
14. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
15. 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.
16. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
17. Алюминиевые сплавы в авиакосмической технике / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука, 2001. 192 с.