



УДК 621.74[.045:6.221]

Поступила 10.01.2018

ПОЛУЧЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ РОТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ЛИТЬЕМ ПО ГАЗИФИЦИРУЕМЫМ МОДЕЛЯМ

Е. И. МАРУКОВИЧ, А. М. БРАНОВИЦКИЙ, А. А. КРУГЛОВ, В. А. ДЕМЕНТЬЕВ, Н. П. САДОВСКИЙ,
Институт технологии металлов НАН Беларуси, г. Могилев, Беларусь, ул. Бялыницкого-Бирули, 11.
E-mail: info@itm.by

Разработана технология производства отливок деталей роторного двигателя из алюминиевого сплава АК12М2. Экспериментально установлена насыпная плотность пенополистирола, дающая наилучшее качество поверхности отливок. Организован участок литья по газифицируемым моделям в экспериментальном цехе института.

Ключевые слова. *Литье по газифицируемым моделям (ЛГМ), качество моделей, пенополистирол, противопригарное покрытие, модельный блок.*

PRODUCTION OF ROTARY ENGINES' PARTS FROM ALUMINUM ALLOYS USING LOST FOAM CASTING PROCESS

E. I. MARUKOVICH, A. M. BRANOVITSKIY, A. A. KRUGLOV, V. A. DEMENT'EV, N. P. SADOVSKIY,
Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus, Mogilev, Belarus,
11, Bialynitskogo-Biruli str. E-mail: info@itm.by

The production technology of casting details for rotary engine from the aluminum alloy AK12M2 is developed. The bulk density of expanded polystyrene to ensure the best quality of the surface of castings has been experimentally established. The lost foam casting shop was organized in the experimental department of the Institute.

Keywords. *Lost foam casting (LFC), quality of models, foamed polystyrene, non-stick coating, model clasting.*

Изготовление отливок сложной конфигурации, имеющих скрытые полости и требующих применения более двух сложных стержней, является трудной задачей. Детали роторного двигателя: крышка передняя, коллектор, статор (рис. 1) являются достаточно сложными по конфигурации деталями, имеющими скрытые полости, сложную ступенчатую поверхность и карманы охлаждения. В отличие от традиционных методов литья при литье по газифицируемым моделям (ЛГМ) модель не извлекается из формы перед заливкой, а в качестве формовочного материала используются различного рода огнеупорные наполнители без связующих, что позволяет получать отливки сложной конфигурации с меньшими затратами по сравнению с традиционными методами литья.

Литье по газифицируемым моделям (ЛГМ) появилось в 50-х годах прошлого столетия для получения художественных отливок. Затем в 60-е годы началось его применение в промышленности. О важности

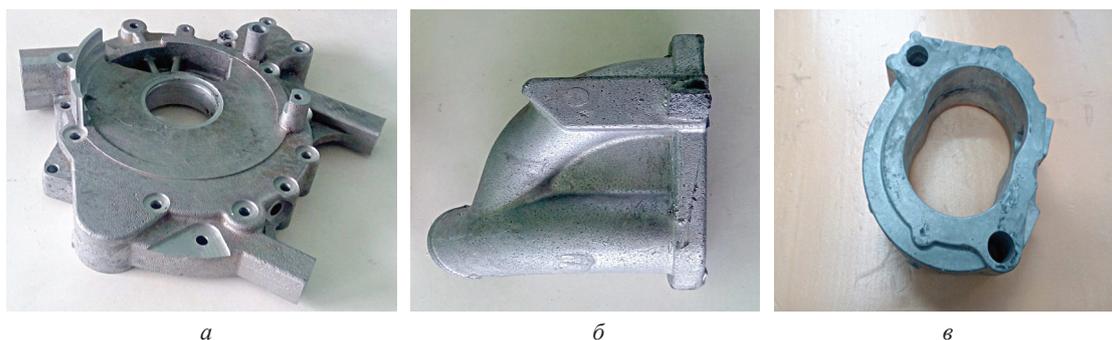


Рис. 1. Отливки деталей роторного двигателя: а – крышка передняя; б – коллектор; в – статор



Рис. 2. Участок изготовления пенополистироловых моделей

ЛГМ свидетельствует тот факт, что свыше 20% всего алюминиевого литья в США производится методом ЛГМ [1]. ЛГМ обладает многими преимуществами перед другими способами литья, например, литьем в землю. С практической точки зрения ЛГМ упрощает литейный процесс, а именно позволяет отливать сложные профили без стержней, для создания отверстий и полостей в отливках. ЛГМ обеспечивает жесткие размерные допуски, гладкую финишную поверхность.

В ИТМ НАН Беларуси создан участок литья по газифицируемым моделям. Изготовление отливок по газифицируемым моделям производится последовательно на участке изготовления пенополистироловых моделей (рис. 2), формовочно-заливочном

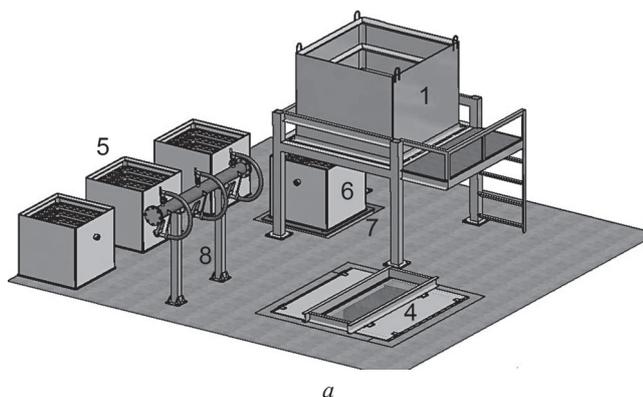
участке (рис. 3) и участке финишных операций. Участок изготовления моделей включает оборудование для предварительной подготовки полистирола, изготовления моделей, сборки моделей и модельных блоков, окраски и сушки модельных блоков. В формовочно-заливочный участок входит оборудование для вибрационной формовки блоков моделей в контейнерах (вибростол), вакуумирования контейнеров, плавки и заливки металла, нейтрализации газов и пыли, извлечения деталей, обрезки литников, прибыльных частей, очистки поверхностей от остатков противопопригарного покрытия.

Важным фактором, обеспечивающим качество и характеристики отливки, является материал модели. При изготовлении моделей используются специальные виды полистирола с повышенным содержанием порообразователя, что увеличивает долю газовой фазы. Контроль равномерности гранул полистирола также имеет очень важное значение для получения больших моделей сложной конфигурации и небольшой массы. Однако при значительном улучшении качества отливок при использовании специального полистирола для моделей, тем не менее, на поверхности таких отливок образуются раковины, заполненные твердым углеродным остатком. По этой причине разрабатывали и испытывали и другие материалы для использования в качестве газифицируемых моделей, например, пенополипропилен и материалы на основе полиметилметакрилата [2].

Весь технологический процесс изготовления моделей разделяется на два этапа: предварительная переработка суспензионного полистирола и изготовление моделей в замкнутом объеме пресс-формы. Оба этапа включают в себя целый ряд операций, каждая из которых оказывает существенное влияние на формирование модели надлежащего качества.

Предварительное вспенивание гранул полистирола необходимо для уменьшения плотности материала модели, которое производится различными способами: в горячей воде, паровой ванне, потоке пара, потоке горячего воздуха и электромагнитном поле высокой частоты.

Сушку гранул осуществляли или в потоке теплого воздуха при температуре 25–30 °С, или стационарно. Время сушки полистирола составляет 6–12 ч. Заполнение пресс-форм гранулами пенополистиро-

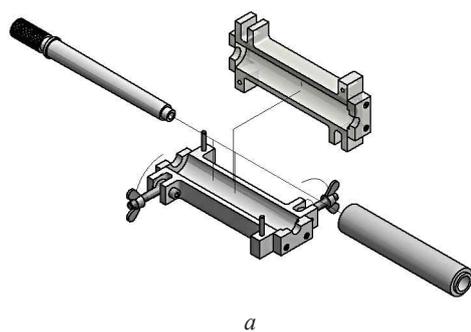


а



б

Рис. 3. Формовочно-заливочный участок: а – схема; б – фотография: 1 – сменный раздаточный бункер; 2 – вакуумный аккумулятор; 3 – вакуумный водокольцевой насос; 4 – приямок; 5 – опоки под монорельсом заливочного ковша; 6 – опока на вибростол; 7 – вибростол; 8 – стенд вакуумирования



a

б

Рис. 4. Пресс-формы для изготовления пеномоделей осевых стержней: *a* – 3D-модель раскрытой пресс-формы и осевых стержней; *б* – изготовленные образцы пресс-форм

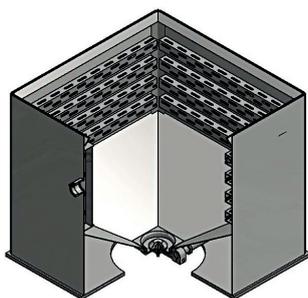


Рис. 5. Литейный вакуумируемый контейнер и модели отливок

ла производили задувным устройством пневматического либо инъекционного типа. Спекание пенополистироловых гранул в модель осуществляли в среде перегретого пара при температуре 110–130 °С в камере автоклава в течение нескольких минут. Для моделей отливок со стенками, толщины которых отличаются кратно, скорость обтекания паром на тонкостенных участках нужно по возможности минимизировать.

Охлаждение пресс-формы происходило в ванне с проточной холодной водой температурой 8–20 °С. Операцию охлаждения пенополистироловой модели вместе с пресс-формой проводили во избежание нарушения ее геометрии, что связано с наличием остатка паров порообразователя в ячейках полистирола. Время охлаждения в зависимости от габаритов пресс-формы составляет 2–10 мин.

Сушку моделей проводили для стабилизации их геометрических параметров. Время вылеживания на стеллажах от 6 ч в зависимости от температуры помещения, где установлены стеллажи. Время хранения модели при исключении поломки не ограничено.

Противопригарное покрытие наносили на модели окунанием в емкости с приготовленной краской, при необходимости труднодоступные места прокрашивали кистью. Кроме предотвращения образования пригара на отливках, повышения жесткости модели, при ЛГМ требуется достаточная газопроницаемость покрытия для удаления продуктов термодеструкции модели, поэтому краску готовили из огнеупорных наполнителей (маршаллит, дистенсилиманиит, цирконовый концентрат, графит, перлит вспученный, тальк) на основе раствора поливинилбутирала в гидролизном спирте или на основе термостойких органических смол [2]. Время сушки одного слоя составляет 1,0–1,5 ч.

На практике стремятся получать элементы литниково-питающих систем цельными с моделями отливок, но это не всегда представляется возможным. Поэтому сложные модели изготавливают из нескольких частей, каждую в своей пресс-форме с одним разъемом, затем их склеивают в цельный модельный блок. Нами в качестве литниковых фрагментов стоячков были выбраны осевые стержни и разработаны для них пресс-формы (рис. 4). Модели самих отливок (рис. 5) были изготовлены по пресс-формам заказчика. Для формовки модельных блоков с габаритами, не превышающими 750×750×600 мм, разработаны два варианта вакуумируемых контейнеров: опоки с донной (рис. 5) и верхней разгрузкой песка. Опоки изготовлены из стали Ст. 3 ГОСТ 380-94. Рабочие габариты опок 800×800×750 мм. Внутри опоки по ее периметру проходят четыре перфорированные направляющие для размещения гибких элементов вакуумирования из металлорукава типа РЗ-Ц-Х-22 У1 (ТУ 22-5570-83). Каждый вакуумпровод подключается к центральному коллектору опоки, через который происходит вакуумирование. Внизу опоки находится люк для донной разгрузки, через который происходит ссыпание песка, а отливка остается вну-

три опоки на имеющихся внизу ребрах. Для опок с верхней разгрузкой песка вакуумирование происходит через дно и боковые отверстия.

Для формовки модельных блоков в опоках в среде огнеупорного наполнителя разработан вибростол (см. рис. 3, 7), который снабжен двумя вибраторами ИВ-98Б, жестко прикрепленными к столешнице стола, которая через резиновые виброгасители прикреплена к раме. Вибраторы расположены в горизонтальной плоскости перпендикулярно друг другу. Вибростол способен работать при дискретном одно- и двухосевом режимах вибрации с круговыми колебаниями, что предположительно должно способствовать заполнению песком закрытых полостей, горизонтально расположенных отверстий и поднутрений модели. Уплотнение песка не зависит от направления вибрации, а зависит только от частоты и амплитуды [2]. Согласно общепринятому положению, выбрано свободное расположение опоки на вибрационном столе.

Для создания разряжения в опоке во время ее заливки разработан стенд вакуумирования (см. рис. 3, 8), позволяющий одновременно подключать до трех опок.

Перед установкой окрашенных модельных блоков в опоку в его донной части создается виброуплотненный слой песка толщиной 50–100 мм. При этом из раздаточного бункера 1 в опоку 6, находящуюся на вибростоле 7, сыпается песок. Далее происходит установка окрашенного модельного блока в опоку и заполнение его песком, при этом происходит его виброуплотнение. Далее поверхность песка, который полностью заполнил контейнер, герметизируется полиэтиленовой пленкой и устанавливаются заливочные чаши.

Для удаления газов в процессе термического разрушения пеномодели опока подключается к системе вакуумирования (см. рис. 3), состоящей из стенда вакуумирования 8, вакуумного аккумулятора 2 и вакуумного водокольцевого насоса 3 типа ВВН6. Водокольцевой насос 3 через вакуумный аккумулятор 2 и стенд вакуумирования 8 создает в опоке разряжение давления порядка 0,01–0,06 МПа. Подключение опок 5 к системе вакуумирования производится за 5–10 мин до заливки металла.

Металл плавится в электрической индукционной печи, доставляется в ковше по монорельсу и заливается через литниковую систему. Не раньше чем через 1,5–5 мин после окончания заливки опока отключается от системы вакуумирования.

После необходимого времени охлаждения отливок опока перемещается на приямок 4, в котором находится бункер для песка. После высыпания песка из опоки оставшиеся отливки извлекаются для дальнейших финишных операций.

Пескооборот реализован пока простейшим способом: после опустошения раздаточного бункера 1, из приямка 4 извлекается бункер с остывшим песком и помещается на эстакаде, замещая опустошенный.

Замещение модели расплавленным металлом зависит от ряда факторов. Для очень высоких температур экспериментальные данные [3, 4] указывают на замедление скорости заполнения, что обусловлено возрастанием с температурой встречного давления газов – продуктов сгорания пенополистирола.

Газопроницаемость покрытия определяет величину потока удаляемых газов-продуктов сгорания пенополистирола. Для большинства красок наблюдается преимущественно линейный спад газопроницаемости с ростом толщины [2]. Для высокопроницаемого покрытия наблюдается линейная зависимость скорости заполнения от температуры заливки [3]. Время заполнения формы может удвоиться из-за типа покрытия. Сила тяжести при этом не столь важна как при обычном литье в разовые формы, поскольку контейнеры с формовочным материалом вакуумируются. Однако при ЛГМ сила тяжести помогает скомпенсировать встречное давление, например [4], при сифонной заливке время заполнения составляло 2,7 с, а при заливке сверху – 1,75 с.

Многопараметрический экспериментальный анализ по исследованию комплексного влияния материалов модели и покрытия, температуры заливки показал, что материал пеномодели играет первичную роль при ЛГМ [5]. В частности, пенополистирол и полиметилметакрилат имеют сходные плотности, но разные химические составы и характеристики термического разложения, из-за чего время заливки для полиметилметакрилата примерно в 3 раза выше, чем для пенополистирола, но с пенополистиролом получается больше вязкого остатка, чем с полиметилметакрилатом. Удельную энергию разрушения материала модели можно определить экспериментально из сравнения перегревов при заливке модели и аналогичной полый формы [2].

Плавку шихты (чушки АК12М2) проводили в поворотной электропечи марки WM-20 в шамотографитовом тигле емкостью 45 кг по алюминию. После расплавления металлизавалки вводили завернутый в фольгу флюс ФМС-5 (100 г), предварительно просушенный в течение 2 ч при температуре 400 °С, пу-

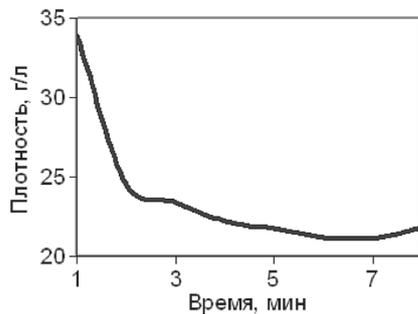


Рис. 6. Зависимость насыпной плотности вспененного полистирола марки К910 от продолжительности нагревания водяным паром

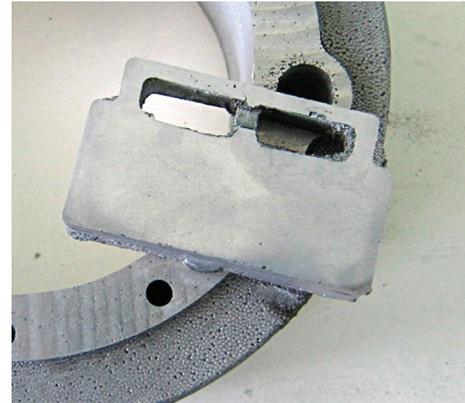
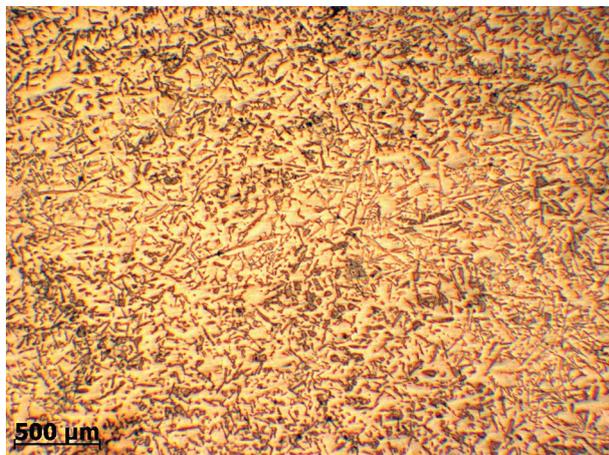
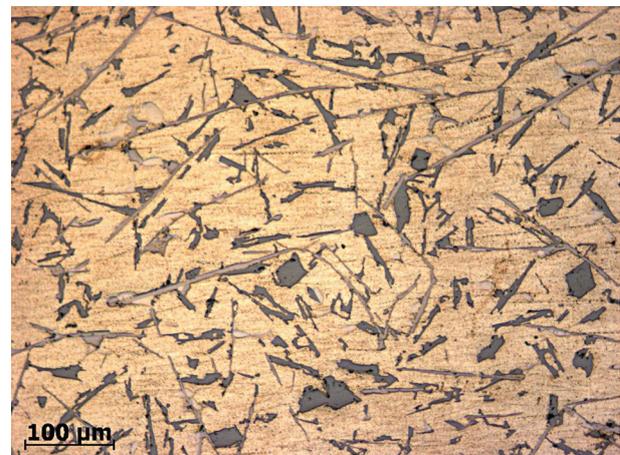


Рис. 7. Шлиф, вырезанный из отливки, полученной в ИТМ НАН Беларуси, на фоне отливки от другого производителя



a



б

Рис. 8. Микроструктура отливки крышки роторного двигателя: *a* – $\times 20$; *б* – $\times 100$

тем замешивания графитовым стержнем. Температура расплава перед разливкой составляла 790–800 °С. За 20 мин до разливки расплава с помощью графитового колокольчика вводили флюс ФТ-2 (15 г). Во время ввода флюса наблюдалось активное бурление расплава с выделением пламени, дыма, едкого запаха и образование сыпучего шлака. Перед сливом в раздаточный ковш расплав перемешивали и снимали шлак.

Для определения плотности пенополистирола, обеспечивающей наилучшее качество поверхности моделей, провели ряд экспериментов, в частности, после обработки в паровой ванне насыпная плотность пенополистирола марки К910 уменьшается в течение нескольких минут (рис. 6), при этом наилучшее качество поверхности моделей получалось при насыпной плотности 28 г/л.

В результате исследований разработана технология производства деталей роторного двигателя (см. рис. 1) из алюминиевого сплава АК12М2, при этом удалось получить плотную структуру отливки (рис. 7). Для металлографического анализа из полученных отливок были вырезаны образцы с большим поперечным сечением. После шлифовки, полировки и химического травления водным раствором кислот (2% HCl + 3% HNO₃ + 1% HF) шлифы исследовали с помощью аппаратно-программного комплекса на базе микроскопа «CarlZeissAxiotech 100 vario». Микроструктура образцов (рис. 8) соответствует литому состоянию, состоит из α -фазы и немодифицированной алюминиево-кремниевой эвтектики. Размер и форма кристаллов эвтектического кремния в алюминиевой матрице характерны для литья в землю с низкой скоростью охлаждения отливки. Отливки имеют твердость в различных частях от 67,2 до 78,3 НВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Divone L. V. U. S. industrial energy efficiency research // Including a focus on metal casting. In NATO/CCMS Pilot Study. Clean Products and Processes (Phase I). 1999. no. 238. 13–15 p.
2. Шуляк В. С. Литье по газифицируемым моделям. СПб.: НПО «Профессионал», 2007. 408 с.
3. Liu X., Ramsay C. W., Askeland D. R. Study on mold filling control mechanisms in the epc process. afs 94–148. In 98th AFS Casting Congress, Vol. 102, Hamilton, Ont., Canada, May 1994; 903–914.

4. **Yao X., Shivkumar S.** Mold filling and solidification in the lost foam process. afs 95–116. In 99th AFS Casting Congress, Kansas City, Missouri, U. S. A., April 1995. P. 761–765.

5. **Wang C., Ramsay C. W., Askeland D. R.** Effect of processing parameters on mold filling for gray iron epc castings using statistical experimental techniques. afs 94–151. In 98th AFS Casting Congress, Hamilton, Ont. Canada, May 1994. P. 921–930.

REFERENCES

1. **Divone L. V.** *U. S. industrial energy efficiency research, Including a focus on metal casting.* In NATO/CCMS Pilot Study. Clean Products and Processes (Phase I), 1999, no. 238, pp. 13–15.

2. **Shuljak V. S.** *Lit'e po gazificiruemym modeljam* [Casting on gasified models]. St. Peterburg, NPO «Professional» Publ., 2007, 408 p.

3. **Liu X., Ramsay C. W., Askeland D. R.** *Study on mold filling control mechanisms in the epc process.* afs 94–148. In 98th AFS Casting Congress, Vol. 102, Hamilton, Ont., Canada, May 1994; 903–914.

4. **Yao X., Shivkumar S.** *Mold filling and solidification in the lost foam process.* afs 95–116. In 99th AFS Casting Congress, Kansas City, Missouri, U. S. A., April 1995; 761–765.

5. **Wang C., Ramsay C. W., Askeland D. R.** *Effect of processing parameters on mold filling for gray iron epc castings using statistical experimental techniques.* afs 94–151. In 98th AFS Casting Congress, Hamilton, Ont. Canada, May 1994, pp. 921–93.