

## Формовочные процессы с применением термической обработки пенополистирола

Предложен способ формовки по моделям из пенополистирола (ППС), которые удаляют из песчаной формы после усадки в результате нагревания. Экспериментально определены температура и продолжительность нагревания образцов ППС для удаления моделей и компактирования отходов ППС. Описаны примеры и преимущества способа, рекомендации его применения на участках ЛГМ и ЛВМ, а также методы упрощения выбивки форм и изготовления экзотермических вставок для прибылей отливок с использованием ППС, прошедшим термообработку.

**Ключевые слова:** литье по разовым моделям, ЛГМ, лопатки ГТД, модели из пенополистирола, утилизация отходов, ФТИМС

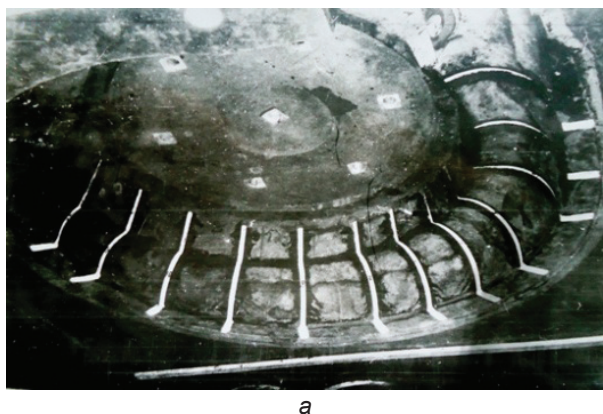
Современное литейное производство, ориентируясь на снижение металлоемкости и повышение точности изделий, развивает растущий сектор процессов литья по разовым моделям, среди которых литье по газифицируемым моделям (ЛГМ) относится к наиболее перспективным технологиям [1]. В. С. Шуляк подробно описал способы ЛГМ [2], производственная реализация которых включает изготовление песчаных форм преимущественно по моделям из пенополистирола (ППС), как недорогого легкообрабатываемого материала.

Известна также формовка по моделям с съемными частями из ППС, примером которой может послужить применение такого процесса литейщиками АО «Невский завод» (г. Санкт-Петербург), выпускающим газовые, паровые турбины и турбогенераторы. На рис. 1, а показана песчано-жидкостекольная нижняя полуформа с съемными газифицируемыми частями – моделями ребер из ППС. Эти ребра устанавливались на деревянной модели, которая была удалена из полуформы, а ребра остались. На рис. 1, б показана стальная отливка корпуса насоса (типа «улитки») весом свыше 10 т с габаритными размерами свыше 4 м, полученная под руководством канд. техн. наук И. Н. Примака. Таким способом обеспечивали экономию затрат и сокращение времени изготовления отливки вместо ранее применяемого

большого количества стержней и соответствующей оснастки для выполнения сравнительно тонких крупногабаритных ребер отливки.

Однако при получении отливок из низко- или безуглеродистых сплавов железа, никеля и некоторых других металлов при ЛГМ по моделям из ППС наблюдается науглероживание металла отливки. Это недопустимо, в частности, для отливок лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) [3], которые традиционно получают литьем по выплавляемым моделям (ЛВМ) в пустотелую форму, предварительно удалив разовую модель. ЛВМ относится к длительным и дорогостоящим производствам. Однако для крупных турбин с длиной лопаток 1,0...1,5 м воскоподобные материалы, подверженные деформации под собственным весом, рационально заменить относительно более прочным ППС с последующим получением полых песчаной формы без модели. Примерами крупных ГТД могут служить двигатель, представленный ГП «Ивченко-Прогресс» на выставке «Авиасвит-XXI» в сентябре 2014 (рис. 2, а), а также двигатель GE90 от GE Aviation для новейших самолетов Boeing 777 [4] (рис. 2, б). По прогнозам в ближайшие 20 лет количество авиаперевозок удвоится, и потому увеличится спрос на литые детали турбин.

Среди процессов удаления модели из ППС перед заливкой металла, кроме удаления из формы



а



б

Рис. 1. Полуформа (а) с съемными частями из ППС и отливка (б) корпуса насоса



а



б

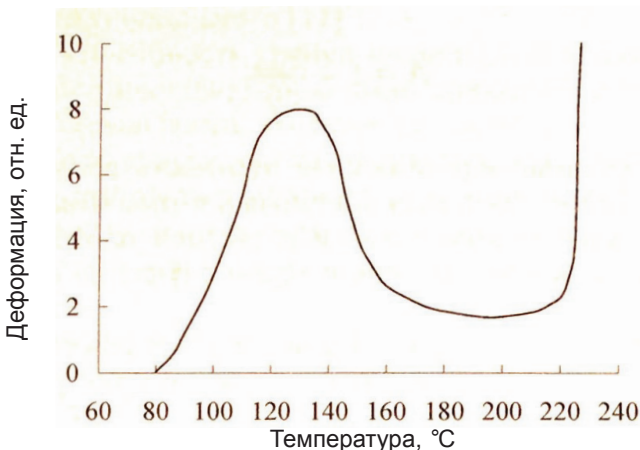
**Рис. 2.** ГТД: производства ГП «Ивченко-Прогресс» на выставке, рядом один из авторов статьи В. Дорошенко для представления о размерах лопаток двигателя (а); двигатель GE90 от GE Aviation для самолетов Boeing 777 (б)

сжиганием в струе кислорода, подаваемого в форму [5], известен способ с нагреванием проволоки, помещенной в модель [6]. В последнем способе изготавливают полость в модели механической деструкцией ППС путем извлечения из материала модели проволоки или нити, заложенной в виде спирали в модель при ее изготовлении. На такой спирали крепят, по крайней мере, один скребок в виде утолщения, которым удаляют разрушающийся ППС из образуемой полости в модели при растягивании витков и вытягивании из модели проволоки, которая действуя на излом, режет или крошит ППС ячеистой структуры стенки модели. С целью уменьшения усилий при извлечении проволоки, в том числе со скребком, материал проволоки нагревают выше температуры плавления материала модели. Однако механическим способом можно лишь частично удалить из литейной формы модель из ППС. Также высока вероятность наличия в том или ином виде остатков ППС в форме при выжигании, что сохраняет возможность насыщения углеродом металла отливки.

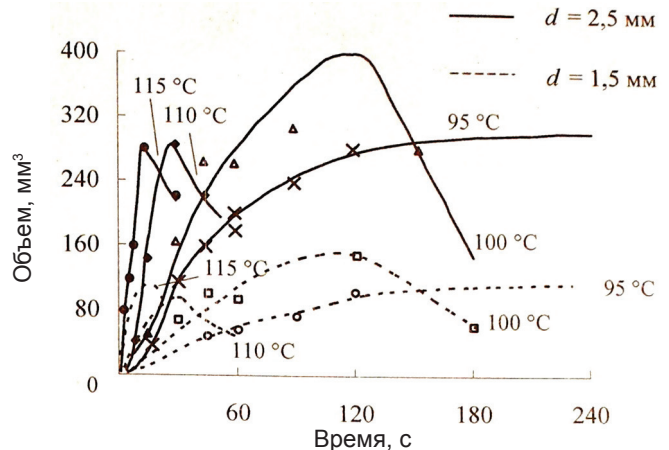
При удалении модели способом растворения в литейной форме жидкий раствор углеводородов может проникнуть в поры песка формы, прилипнуть к ее стенкам или ППС может остаться в нерастворенном

виде в узких частях полости формы [7], особенно при получении отливок сложного профиля [3]. Растворение модели связано с использованием химически активных и часто экологически небезопасных жидких органических растворителей, затратами по утилизации их растворов и удалении испарений. Существует опасность размывания или деформирования форм при кантовании во время выливания раствора ППС и промывки, не всегда полного предотвращения науглероживания металла.

Термодеструкция моделей, например, лопаток ГТД, выжиганием в оболочковых (керамических) весьма хрупких литейных формах может деформировать форму, поскольку процессы получения моделей из ППС основаны на известных зависимостях деформации при расширении полистирола от температуры (рис. 3, а) и объема вспененных гранул от времени выдержки в теплоносителе (рис. 3, б) [2]. В процессах ЛГМ оптимальных условий расширения гранул ППС достигают с учетом того, что максимальная деформация ППС в области пластического состояния находится в интервале 120...130 °С, а длительная выдержка при 97...105 °С приводит к усадке гранул, которую практически всегда рассматривают как негативное явление, предостерегая



а



б

**Рис. 3.** Зависимости: деформации полистирола от температуры (а); объема вспененных гранул от времени выдержки в теплоносителе (б)

модельщиков от так называемого «перепекания» моделей, приводящего к их браку. Возможность указанного расширения модели как важное условие упрочнения формы учитывали при переходе от ЛВМ к новым процессам с моделями из ППС [2].

Кроме того, газификация или выжигание модели из ППС в литейном цехе относятся к экологически вредным операциям из-за выделяемых газов, которые следует удалить из цеха посредством весьма дорогостоящего оборудования для их очистки. А газифицируемые модели обязательно должны обладать определенной невысокой плотностью [2], поскольку несоблюдение этого условия приводит к определенным техническим проблемам.

Анализ «волнообразного» (рис. 3, а) влияния температуры на изменение объема изделий из ППС наталкивает на определенные вопросы:

– Почему в процессах ЛГМ используют лишь расширение гранул ППС при спекании моделей в пресс-формах, но опасаются усадочной стороны «волны»?

– Как такую специфическую особенность ППС – способность его к многократной по величине усадке при термообработке использовать для удаления моделей из литейной формы?

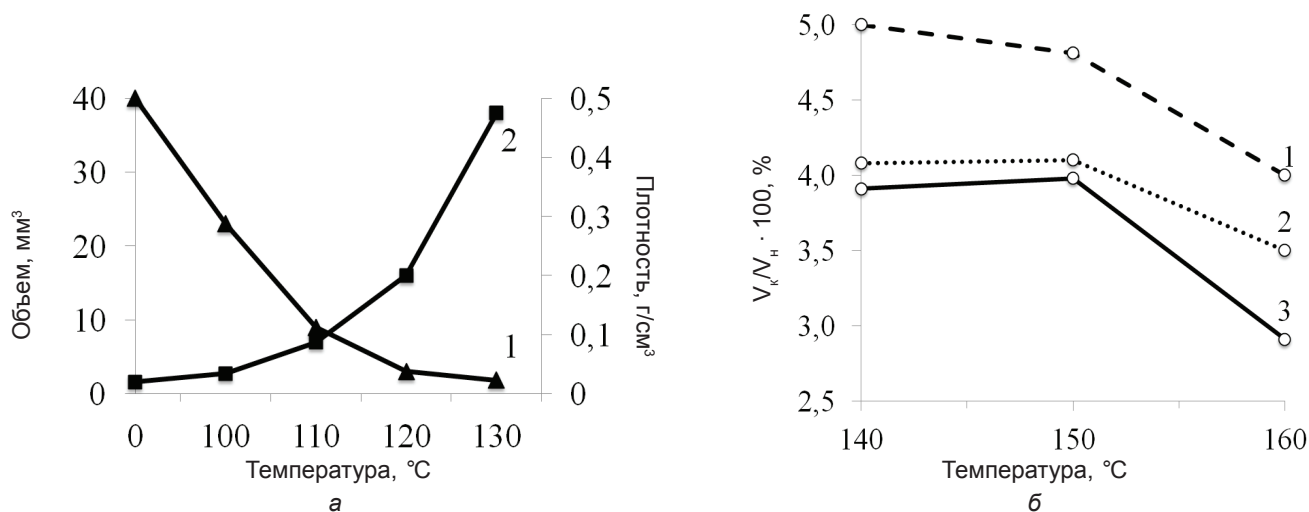
Поэтому были проведены работы по исследованию зависимости уменьшения размеров моделей из ППС от температуры и времени нагревания для освобождения от них полости литейной формы, поскольку показанные на рис. 3 зависимости были получены для ППС на стадии изготовления моделей. Наряду с этим учитывали опыт термокомпактирования отходов ППС как способа их утилизации и рециклинга [8, 9], в частности, в процессах изготовления композитных материалов.

Исследования проводили на образцах ППС с плотностью в среднем  $20 \text{ кг/м}^3$  в геометрической форме куба трех типоразмеров с длиной ребра 1, 2 и 3 см и объемом соответственно 1, 8 и  $27 \text{ см}^3$ . Термокомпактирование этих образцов выполняли в камере лабораторного сушильного электрошкафа СНОЛ 67/350 с диапазоном автоматического регулирования температуры в интервале  $50 \dots 350 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Массу определяли на лабораторных электронных весах мод. ВЛ Э134 (ТУ 25-7713.0013-89) 4-го класса точности с ценой деления – 5 мг и систематической погрешностью  $\pm 2,0 \text{ мг}$ . Образцы из блоков ППС типа ПСБ-С-25 вначале вырезали с четкой геометрией, позволяющей выполнить измерения и определить объем, затем их взвешивали и рассчитывали плотность. В дальнейшем геометрия вырезаемых образцов могла быть недостаточно точной, но по массе образца  $m_n$  и его плотности рассчитывали начальный объем  $V_n$ . Чтобы получить более точные измерения одновременно брали 5 образцов.

Для определения объема  $V_k$  образцов после операции термокомпактирования применяли мерные цилиндры с диаметрами, близкими к габаритным размерам образцов. Так, объем одновременно пяти образцов с размерами  $1 \text{ см}^3$  определяли в цилиндре диаметром 11 мм по разнице уровней залитой в него воды до и после погружения образцов. Затем рассчитывали  $V_k / V_n \cdot 100 \text{ (\%)}$ , а также плотность термокомпактированного ППС (рис. 4, а) [8]. Поскольку усадочные изменения ППС заметны при температуре выше  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  и усиливаются к 160 (рис. 3, б), то исследования проводили в этом интервале температур, и при нагревании в течение 15 мин фиксировали резкое уменьшение объема образцов ППС. При  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  оно практически не зависело от размера взятых образцов ППС, процесс термокомпактирования соответственно увеличивал плотность ППС. Так, для образцов объемом  $1 \text{ см}^3$  она увеличилась в 10,9 раза, с объемом  $8 \text{ см}^3$  – в 10,3, для более крупных образцов с объемом  $27 \text{ см}^3$  – в 12,0 раз. При  $130 \text{ }^\circ\text{C}$  наблюдалось дальнейшее незначительное уменьшение объема образцов. С ростом температуры в интервале  $100 \dots 130 \text{ }^\circ\text{C}$  начальная  $m_n$  и конечная  $m_k$  массы образцов ППС не отличались ( $m_n = m_k$ ).

Определили, что оптимальные размеры кусков после дробления отходов должны быть не крупнее  $2 \times 2 \times 2 \text{ см}$  [8]. Для сокращения 15-минутной операции температурного воздействия с учетом перспективы перевода его на конвейерный транспорт с проходной печью провели аналогичные исследования



**Рис. 4.** Влияние температуры нагрева пяти образцов ППС размерами  $2 \times 2 \times 2 \text{ см}$ : на изменения их объема и плотности при нагревании в течение 15 мин.: 1 – кривая изменения объема; 2 – кривая изменения плотности (а); на степень уменьшения их объема (в % к начальному) при продолжительности, мин: 1 – 5; 2 – 10; 3 – 15 (б)



по влиянию температур в пределах 140...160 °С при компактировании в течение 5 и 10 мин (рис. 4, б).

При 140 °С и 5-ти минутном нагреве объем образцов ППС уменьшился в 20 раз. При 10 и 15 мин эти изменения были несущественными. При 150...160 °С картина аналогична. Наиболее рациональным является процесс нагрева образцов ППС при 140 °С в течение 5 мин. Другие варианты связаны с более высокими температурами и увеличением времени воздействия, что увеличивает затраты.

Информация из монографии [2] и результаты экспериментов по усадочным процессам ППС послужили основой для создания способа литья по термокомпактируемым моделям, на который подали заявку о патентовании. В общей схеме реализации способа предусмотрено, что при уменьшении размеров модели из ППС (или детали таких моделей) практически без изменения массы отходят от стенки формы и остаются свободно лежать в полости формы, откуда их извлекают перед заливкой металла.

Модели различной конфигурации, изготовленные в пресс-формах под давлением пара 0,13...0,14 МПа при температуре 115...120 °С, и их термокомпактированные образцы показаны на рис. 5. Рядом (рис. 5, а) две модели корпуса суппорта тормоза легкового автомобиля до и после термокомпактирования (выдержка в автоклаве 4...5 мин). Масса модели – 9,5 г, габаритные размеры модели отливки – ~180 мм, после термокомпактирования – ~100 мм. Таким же образом показаны две модели кронштейна (рис. 5, б), и образцы ППС, один из которых прошел термообработку (рис. 5, в).

Однако рамочные модели подобной конструкции и с наличием в них отверстий пока не могут применяться для удаления после усадки. Необходимо создать способы разделения моделей на составные части в полости формы без создания давления усаживаемой модели на стенки формы. Для крупных сложнофасонных отливок возможно проектирование распадающейся при усадке модели без зажимов ими песчаной формы со стенками достаточной прочности и без опасности их деформирования, либо с установкой в полости формы песчаных стержней после удаления модели. Для моделей с выпуклыми поверхностями способ термоусадки пригоден без усложнения конструкции модели, для других моделей – данные этой статьи следует использовать

для постановки задачи на конструирование моделей из составных частей.

Помещение в материал модели легковесного проволочного каркаса с выводом его концов для удобного захвата облегчает удаление усаженной модели из формы. При выводе концов каркаса в виде ленты или трубки из цветного металла с высокой теплопроводностью за пределы литейной формы и помещении литейной формы в нагревательную камеру модель будет нагреваться через стенки формы и каркас, что можно совместить, например, с процессом сушки литейной формы. Каркас служит теплопроводным элементом от нагретого воздуха камеры в центральную часть модели. И от него в первую очередь нагревается и усаживается средняя часть модели. При этом периферийные слои остаются достаточно прочными, чтобы удерживать возможное расширение ППС, предотвращая давление на стенки формы. Далее нагреваются пристеночные части модели, когда им уже создано место для деформации усевшими центральными частями. Образуются зазоры между формой и моделью, между стенками модели вдоль каркаса для поступления горячего воздуха из нагревательной камеры.

Проволочным каркасом из нихрома можно нагреть модель пропусканием через него электротока, а трубчатым каркасом – жидкого или газообразного теплоносителя. Значительная величина температурного интервала для усадки ППС дает возможность нагревания моделей с различной скоростью и контролем температуры без высокой точности, что несложно реализовать в условиях литейного цеха в сочетании с сушкой или начальной стадией прокаливания форм. Как вариант, возможно пропускание по трубчатому каркасу жидкого (водного солевого раствора, глицерина) или газообразного теплоносителя (пара, нагретого воздуха), которое несложно выполнить без контакта с воздухом цеха с многократной циркуляцией по трубкам теплоносителя через устройство для его нагрева.

В предложенном способе необходимо упрочнение наполнителя песчаной формы в опоке, при которой полость формы сохраняет свои размеры при нагревании модели, что предотвращает деформацию формы от деформирования модели. Такое упрочнение достижимо многими известными способами. Для изготовления форм пригодны, например,

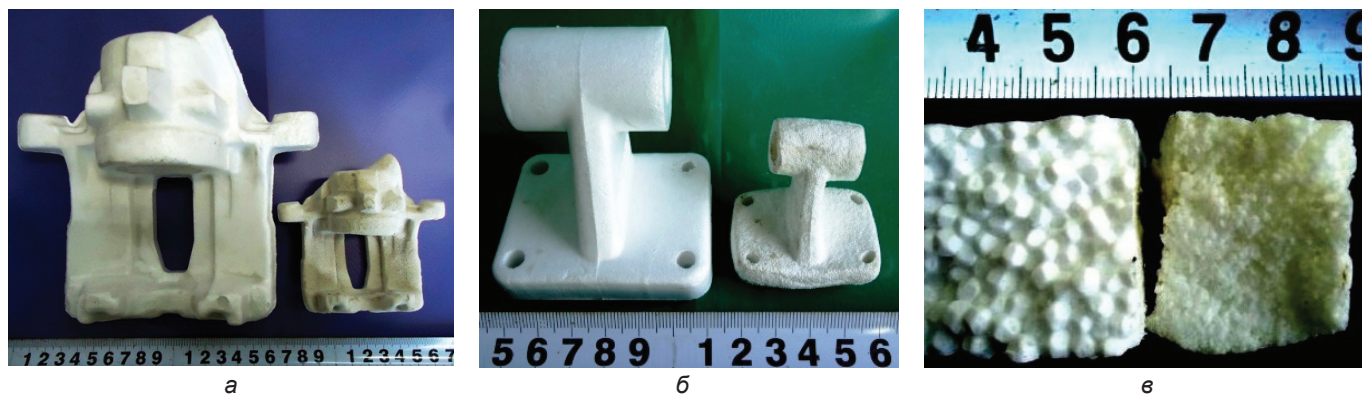


Рис. 5. Образцы до и после термокомпактирования в автоклаве: модель корпуса суппорта тормоза автомобиля (а); модель кронштейна (б); ППС, поверхность излома (в)

самотвердеющие песчаные пластичные смеси с жидкостекольным связующим при формовке по  $\text{CO}_2$ -процессу или ЖСС [10].

Применение оболочковых керамических форм, традиционных для литья деталей ГТД, также не сложно совместить с вакуумной формовкой. Для этого предложен [11] следующий порядок операций. Оболочковую форму с моделью засыпают в контейнере песком, виброуплотняют его, герметизируют верхний лад формы термостойкой пленкой, а в период нагревания модели или всей формы с моделью песок формы вакуумируют с остаточным давлением 20...60 кПа. После термоусадки модели ее извлекают из формы при отключении вакуума. Вакуумируемый песок по технологии вакуумной формовки имеет достаточную прочность для сохранения размеров полости формы при возможном расширении модели в короткий период перед значительной усадкой. Такую форму можно без потери темпа нагревания после извлечения компактных остатков модели направить на прокалку для последующей заливки металлом, используя, например, конструкцию формы [11], в которой после отключения вакуумирования удаляется часть оснастки со средствами вакуумирования, а песчаная форма продолжает нагреваться до температуры прокаливания в металлических жакетах.

Рассматриваемый способ разработан прежде всего для стального литья, технология которого обычно включает питание отливки прибылями. Применение открытых прибылей, удаление моделей которых открывает каналы для удаления всех частей компактных остатков модели – необходимое и достаточно несложное условие реализации способа.

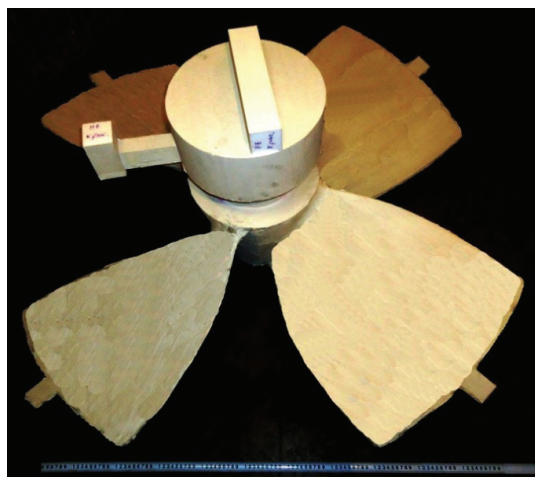
Такие конструкции моделей позволяют (кроме указанных способов нагревания) применять строительные или технические фены с направлением потока горячего воздуха в эти каналы для нагревания моделей аналогично подаче кислорода в полость формы [5].

В примере на рис. 6 показаны окрашенная модель (а) и отливка (б) винта из нержавеющей стали, выполненные в ФТИМС НАН Украины по ЛГМ-процессу технологами отдела формообразования под руководством проф. О. И. Шинского. Габаритные размеры

изделия – до 1,2 м, на фото снизу – лента рулетки. Четыре лопасти выполняли из ППС, крепили их на ступице или валу. Модели лопастей имеют приливы для гарантированной заливки металлом их тонких частей. Как тело вращения вал удобно выполнить из блочного ППС механической или термической резкой, формовать с вертикальным расположением его оси и расширяющейся частью кверху. Модель на валу сверху имела конусную открытую отъемную прибыль, отливка показана без прибыли и приливов.

При проектировании процесса литья удалением модели с использованием термоусадки предложено лопасти выполнить в виде отъемных частей, модель вала и прибыли изготавливать составными известными способами так, чтобы после упрочнения формы можно было бы извлечь из формы модель конусной открытой прибыли, части модели вала и раскрепить между собой модели лопастей. По разработанному способу после упрочнения формы перечень операций включал удаление из формы отъемных или составных частей модели открытой прибыли в виде усеченного конуса и части вала, оставив модели четырех лопастей в форме. Далее по разработанной технологии предусмотрено после нагревания и усадки этих моделей лопастей извлечение их уменьшенных остатков через отверстие, ранее отформованное моделью удаленной прибыли.

Описанная технология формовки по моделям из ППС, удаляемых из песчаной формы после их усадки в результате нагревания, находится на стадии патентования, уточнения области применения с учетом новых решений по конструированию моделей и начального опробования в лабораторных условиях. Экспериментально определена температура и продолжительность нагревания образцов ППС для компактирования отходов ППС и усаживания моделей. Описаны примеры и преимущества применения термообработки моделей и отходов из ППС для процессов песчаной формовки, рекомендации его применения на участках ЛГМ и ЛВМ, а также методы упрощения выбивки форм и изготовления экзотермических вставок для прибылей отливок с использованием ППС, прошедшим термообработку.

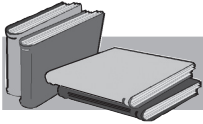


а



б

Рис. 6. Модель (а) и отливка (б) винта из нержавеющей стали



## ЛИТЕРАТУРА

1. Шинский О. И. Снижение металлоемкости литейной продукции – основа развития отрасли // Оборудование и инструмент для профессионалов. – 2011. – № 1. – С. 78-79.
2. Шуляк В. С. Литье по газифицируемым моделям. – СПб.: Профессионал, 2007. – 408 с.
3. Шинский О. И., Максюта И. И., Нейма А. В. Особенности применения растворимых пенополистироловых моделей для получения сложнопрофильных деталей ГТД // Металл и литье Украины. – 2013. – № 9. – С. 14-18.
4. Стеценко А. І. Найбільший авіадвигун планети могутніше космічної ракети // <http://adps.in.ua/2014/01/03/4434/> (дата обращения: 8.10.2014).
5. А. с. СССР 217606 МПК В22С 9/04. Способ удаления из литейной формы газифицируемой модели / А. В. Лакедемонский, В. Н. Иванов, Г. И. Пленцов, А. Д. Шерман, В. С. Шуляк. – Оpubл. 07.05.1968, Бюл. № 16.
6. Пат. UA 91224, МПК В22С 9/02. Способ формовки по разовым моделям. О. И. Шинский, В. С. Дорошенко, А. В. Нейма – Оpubл. 25.06.2014, Бюл. № 12.
7. Пат. UA 86634, МПК В22С 9/02, 9/04, 7/00. Способ изготовления песчаных форм по моделям, которые поглощаются песком формы / О. И. Шинский, В. С. Дорошенко. – Оpubл. 12.05.2009, Бюл. № 9.
8. Тихонова О. А., Стрюченко А. А. Исследование процессов термокомпактирования отходов пенополистирола // Процессы литья. – 2010. – № 6. – С. 59-64.
9. Пат. UA 82838, МПК С08J 11/04. Способ получения полимерного композиционного материала / О. И. Шинский, А. А. Стрюченко, В. С. Дорошенко, И. О. Шинский, П. В. Русаков. – Оpubл. 12.08.2013, Бюл. 15.
10. Дорошенко В. С., Болух В. А. Получение крупных стальных отливок по газифицируемым моделям с использованием наливной формовки // Тяжелое машиностроение. – 2010. – № 10. – С. 16-20.
11. А. С. СССР № 1629140, МПК В22С 21/00, 21/01 Литейная форма для вакуумно-пленочной формовки. В. С. Дорошенко, Н. И. Шейко. – Оpubл. 23.02.1991, Бюл. №7.

### Анотація

*Тихонова О. А., Дорошенко В. С., Шинський В. О.*

Формувальні процеси із застосуванням термічної обробки пінополістиролу

*Запропоновано спосіб формування за моделями з пінополістиролу (ППС), які видаляють з піщаної форми після усадки в результаті нагрівання. Експериментально визначені температура і тривалість нагрівання зразків ППС для видалення моделей і компактування відходів ППС. Описано приклади і переваги способу, рекомендації його застосування на ділянках ЛГМ і ЛВМ.*

### Ключові слова

*литья за разовими моделями, ЛГМ, лопатки ГТД, моделі з пінополістиролу, утилізація відходів, ФТІМС*

### Summary

*Tikhonova O., Doroshenko V., Shinsky V.*

Molding processes using thermal treatment polystyrene

*There provides a method for casting patterns of expanded polystyrene (EPS) for the removal of the sand mold these patterns after shrinkage due to the heat, called thermal compaction. The temperature and duration of heating EPS samples to remove patterns and compacting waste EPS were determined experimentally. There are examples and advantages of the method, the recommendations of its use in various foundries.*

### Keywords

*casting for removable patterns, Lost Foam Casting, blades of gas turbine engines, the patterns of EPS, waste management, PTIMA*

Поступила 14.10.14