

## Особенности применения растворяемых пенополистироловых моделей для получения сложнопрофильных деталей ГТД

*Проведены исследования технологического процесса изготовления литейных керамических форм способом удаления пенополистироловой модели при растворении ее органическими растворителями. Определены температурно-временные параметры процесса растворения и удаления продуктов деструкции для группы растворителей в формах разных объемов. Установлено, что отсутствие поверхностных дефектов отливок, полученных этим способом, снижает затраты на механическую обработку литых деталей, и это существенно увеличивает коэффициент использования дорогостоящих жаропрочных сплавов.*

**Ключевые слова:** растворяемая модель, жаропрочный сплав, температурно-временные параметры, продукты деструкции, керамические формы

**В**ведение. Задача замены литья по выплавляемым моделям (ЛВМ) литьем по пенополистироловым растворяемым моделям является в настоящее время технологически, экономически и экологически перспективной с точки зрения промышленного использования на предприятиях газотурбостроения Украины. Одно из важных направлений развития энергетического машиностроения в Украине – это создание газотурбинных установок (ГТУ) большой мощности длительного ресурса работы, например, изготовление энергетических агрегатов газоперекачивающих станций. Эта проблема требует решения материаловедческих и технологических задач, связанных с процессами литья, в том числе формообразования при получении габаритных сложнопрофильных отливок, к которым относятся сопловые и рабочие лопатки турбин. К сожалению, как показывает научно-патентный анализ работ предприятий, занимающих лидирующие позиции в этой отрасли в нашей стране, СНГ и за рубежом (НПКГ «Зоря»-«Машпроект», ОАО «Мотор-Сич», ЗМКБ «Прогресс», Украина; ФГУП «ВИАМ», ФГУП ММПП ВИЛС, ЦНИИТМАШ, ЦКТИ, Россия; концерны Pratt & Whitney, General Electric Co, Teledyne, Rolls-Royce Ltd, США; «INCO», «First Rixson», Великобритания; Martin Marietta Corp., ONERA, Франция), который проводили в последние годы специалисты ФТИМС НАН Украины, данная проблема на протяжении многих лет не нашла ни научного, ни промышленного оптимального решения. Связано это, прежде всего, с большим количеством сложнопрофильных поверхностей литых деталей, в частности лопаток газотурбинных двигателей (ГТД), что является причиной низкого уровня выхода годной продукции.

*Состояние вопроса, цели и задачи исследования.* Для литья вышеупомянутых деталей предприятия газотурбостроения используют оболочковые формы из огнеупорной керамики, преимущественно на основе корунда, внутренние профили которых выполняют с помощью выплавляемых моделей (метод ЛВМ).

Такой процесс достаточно трудоемкий и экологически неблагоприятный. Кроме того, у этого метода при нагревании модельных составов из легкоплавких материалов довольно ограниченная область применения (в основном для отливок малой массы – до 1 кг) из-за низкой (около 30 °С) температуры размягчения, значительной объемной и линейной усадки, а также высокого коэффициента расширения.

В качестве альтернативы изготовления форм по выплавляемым моделям можно применить получение оболочковых форм с использованием газифицированных моделей. Обладая несомненными преимуществами (повышение точности геометрических размеров отливок, уменьшение затрат на оборудование и материалы, снижение трудозатрат, сокращение отходов производства, увеличение номенклатуры отливок), способ литья по газифицируемым моделям при получении рабочих и сопловых лопаток имеет и свои существенные недостатки, основным из которых является возможность появления специфических дефектов поверхности отливок (ячеистость, связанная с особенностью структуры модельного материала на поверхности моделей; волнистость поверхности; науглероживание; отдельные коксазовые раковины; плены углерода; спаи на поверхности мелких и средних отливок, образующиеся вследствие взаимодействия металла, заполняющего форму, с продуктами неполного разложения модели) [1-4]. Кроме того, следует учитывать, что при использовании сплавов со строго контролируемым низким содержанием углерода (0,01-1,20 %мас.), к которым относятся многокомпонентные низко- и высокохромистые жаропрочные сплавы для рабочих и сопловых лопаток ГТУ, в результате процесса деструкции модели может наблюдаться насыщение всего объема отливки углеродсодержащими газовыми фракциями, что приводит к снижению эксплуатационных характеристик детали.

Учитывая вышеизложенное, замена выплавляемых моделей пенополистироловыми растворяемыми

для крупногабаритного сложнопрофильного литья (охлаждаемые лопатки ГТД) является в настоящее время достаточно перспективной для предприятий газотурбостроения Украины.

Как известно, в процессе термического удаления пенополистирола (при температуре заливки расплава порядка 1450-1500 °С) из керамической оболочки он способен увеличиваться в объеме на 25-30 % от первоначального, что приводит к растрескиванию формы с образованием трещин размером от 0,1 до 2,0 мм. Под действием тепловой энергии происходит деструкция пенополистирола с образованием жидкой, твердой и газообразной фаз, соотношение которых зависит от плотности полистирола, его теплофизических констант и температуры источника тепла. Жидкие продукты под действием тепловой энергии расплава на границе металл-форма подвергаются дальнейшей деструкции до образования твердых, паро- и газообразных летучих компонентов [1, 5].

Парообразные продукты – это мелкие частички полимерной цепи, которые летучи при температуре заливки металла. К ним относятся стирол, толуол и их производные. Твердые частицы представляют собой частички углерода. Газообразная фаза состоит из непредельных углеводородов типа  $CH_4$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_3H_6$  и других, а также из водорода, окиси углерода и азота. Хотя количество продуктов деструкции незначительно с точки зрения объема модели, его достаточно, чтобы повлиять на качество отливки и свойства литого металла. Так, по опыту литья по газифицируемым моделям в песчаные формы известно, что при формировании литой поверхности отливок из низкоуглеродистых сталей и жаропрочных сплавов имеют место как ситовая пористость металла отливок, так и пористость отливок по всему объему металла, а также образование на поверхности отливок спаев и каверн [3-5].

В процессе разработки технологии заливки фасонных отливок из сложнолегированных сплавов на основе никеля авторы работы решили задачу сохранения основных этапов технологического процесса изготовления форм, принятых для предприятий отрасли, и выбрали экономически целесообразный технологический процесс удаления модели и продуктов ее деструкции, который обеспечивает минимизацию их взаимодействия. Удаление модели из полости формы производили с помощью подобранного соответствующего растворителя, который позволил перевести пенополистироловую модель в жидкую и гелеобразную фазы и смог устранить проблему выделения газов при литье. После этого этапа оставалось выбрать технологический прием полного удаления продуктов растворения из полости оболочки, то есть совместить термическую обработку (прокалку) готовой формы с удалением из полости оболочки продуктов деструкции с остатками растворителя.

В ФТИМС НАН Украины в отделе физико-химии процессов фор-

мообразования в настоящее время сотрудники продолжают работу по оптимизации технологического процесса получения оболочковых форм путем замены выплавляемых моделей на растворимые при получении равноосных и ориентированных деталей из новых высокохромистых сплавов на никелевой и кобальтовой основе.

Основная задача представленных исследований – обеспечение максимально полного удаления продуктов деструкции модели для минимизации их взаимодействия с жидким металлом с целью повышения качества поверхности отливки при снижении объема механической обработки поверхности и повышение за счет этого экономии материалов. При решении поставленных научно-технических задач провели комплекс экспериментов по подбору технологических параметров получения и удаления пенополистироловых моделей для формовочной смеси различного состава с учетом марки заливаемого сплава, типа (марки) применяемого пенополистирола, способа формования модели, типа растворителя и габаритов отливки с равноосной или ориентированной структурой.

*Выбор объектов исследования и постановка экспериментов.* Для проведения исследований на данном этапе при получении отливок выбрали разрабатываемые в ФТИМС НАН Украины совместно с ГП НПКГ «Зоря»-Машпроект» (г. Николаев) высокохромистые модельные сплавы на основе никеля марки ЧС 104 (ХН57КТВЮМБЛ): Ni(основа)-0,10С-20,0Сг-2,5Аl-3,5Тi-10,2Со-0,05Zr-0,5Fe, в которые, с целью повышения эксплуатационных характеристик, вводили элементы дополнительного легирующего комплекса (0,20-0,60)Mo-(2,0-5,0)W-(0,10-0,40)Nb-(1,0-3,0)Ta-(1,0-3,0)Re [6] для сопловых и рабочих лопаток судовых и энергетических ГТД. Выбор данного сплава обусловлен широкой востребованностью этой марки на предприятиях газотурбостроения Украины и России. Основные механические характеристики оптимального состава высокохромистого сплава типа ЧС104 (ХН57КТВЮМБЛ-ВИ) приведены в таблице. Как показали исследования, проведенные методом высокотемпературного дифференциального термического анализа (ВДТА) на установке ВДТА-8М с точностью 5 °С (рис. 1), у таких сплавов температура плавления в области ~1370 °С.

В качестве формовочной композиции применили огнеупорную смесь на основе микропорошка М10 электрокорунда белого марки 24А, ГОСТ 3647-80, модифицированную [7] порошками алюминия АСД-4

#### Механические характеристики оптимального состава высокохромистого сплава марки ЧС104 (ХН57КТВЮМБЛ) [6]

Наименование свойств	Температура испытания, °С					Примечание
	20	700	800	900	950	
Предел прочности, МПа	920-1050	890-990	840-920	640-750	–	$l = 5d$
Относительное удлинение, %	4-7	3-8	4-10	9-16	–	$l = 5d$
Относительное сужение, %	5-10	4-16	5-21	9-12	–	$l = 5d$
Ударная вязкость, МДж/м <sup>2</sup>	0,10-0,18	0,12-0,16	0,13-0,17	0,13-0,16	–	–
Жаропрочность за 100 ч, МПа	–	690	410	280	–	–



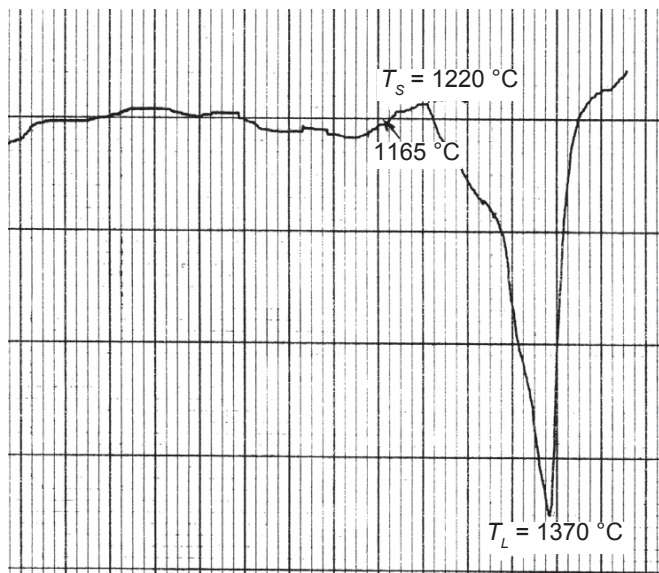


Рис. 1. Температура основных фазовых превращений ( $T_s$ ,  $T_L$ ) сплава оптимального состава, определенная методом ВДТА

(ТУ 48-5-226-82) и кремния (Кр-1), а в качестве связующего – этилсиликат 40 (ТУ 6-02-641-86). Микроструктура полученной керамики на основе корунда приведена на рис. 2. При изготовлении формы в качестве базовой технологии использовали регламент ТИ 260-424-91, принятый к серийному производству форм на предприятиях машиностроения, изготавливающих фасонные отливки по выплавляемым моделям для деталей ГТД.

Для растворения пенополистироловой модели в качестве подходящих химических реагентов экспериментально опробовали такие растворители, как толуол, ацетон, растворители № 646 (смесь толуола, этанола, ацетона и других) и № 647 (смесь пиробензола, бутанола, этилацетата и бутила). При этом учитывали экономичность и практическую доступность, а также относительную экономическую безопасность предложенного растворителя. Важным показателем целесообразности внедрения того или иного растворителя является также возможность вторичного применения продуктов растворения.

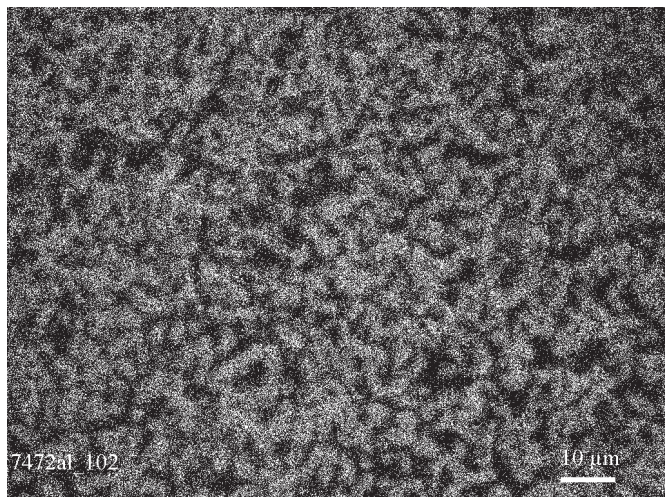


Рис. 2. Микроструктура керамики на основе модифицированного корунда, использованная в качестве формовочной массы (МРСА в характеристических лучах алюминия)

Для изготовления моделей использовали суспензионный пенополистирол марки ПСВ-Л1, подвспененные гранулы которого имели плотность  $25 \text{ кг/м}^3$ .

Известно, что наиболее технологичным способом формования моделей при ЛРМ является в настоящее время спекание в автоклаве [8]. Изготовление моделей производили в автоклаве ГП-400. При этом подвспененный и выдержанный пенополистирол задували в пресс-формы и спекали при температуре  $120\text{-}130 \text{ }^\circ\text{C}$  и давлении  $120\text{-}130 \text{ кПа}$ .

Влияние плотности пенополистирола на скорость растворения наименее изучено среди различных факторов. Как известно, плотность полистироловой модели зависит от количества гранул в данном объеме и от плотности их упаковки. С возрастанием плотности модели увеличиваются толщины стенок микроячеек, что, видимо, и оказывает решающее влияние на продолжительность растворения в целом.

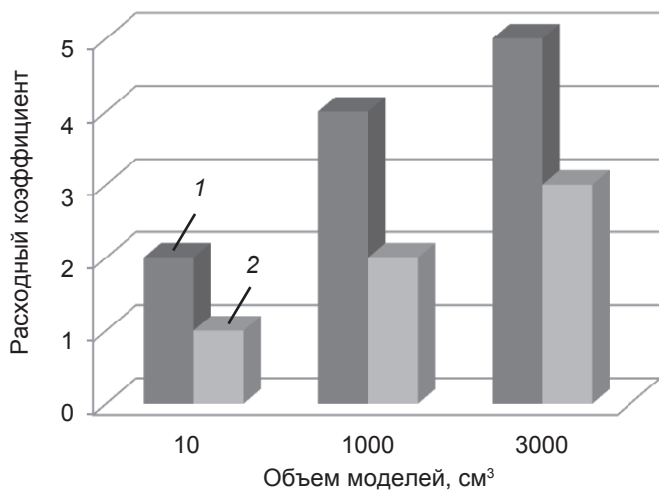
Одной из причин разной продолжительности растворения, как следует из анализа качества моделей, является их структурная неоднородность, характеризующаяся различной степенью спекаемости гранул от поверхности модели к ее центру. Более однородные слои модели растворяются значительно быстрее, чем хуже спекшиеся и разобщенные ее внутренние участки [8].

Таким образом, для решения поставленной в данной работе задачи на первом этапе провели комплекс экспериментов по выбору температурно-временных параметров процесса растворения (деструкции) для форм разных объемов с применением различных растворителей, позволяющих перевести пенополистироловую модель в жидкую или гелеобразную фазы (с наиболее полным удалением продуктов деструкции). На втором этапе работы в керамические формы на основе корунда, полученные после растворения моделей, залили расплав в вакуумно-индукционной печи УППФ-2 (Россия, г. Ржев). Затем оценили качество полученных отливок с точки зрения газонасыщения и дефектов поверхностного слоя в зоне контакта металл-форма, что дало возможность проанализировать полноту удаления продуктов деструкции модели предложенным способом.

С целью проведения опытов выбрали 10 моделей разного объема от  $10 \text{ до } 3000 \text{ см}^3$ , по которым изготавливали модели разной конфигурации, учитывающей разность сечений и профилей натуральных деталей. В зависимости от геометрии модели начальный этап растворения при  $T_{\text{комн}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  занимал от 5 (имитация сопловой лопатки) до 20 мин (имитация литой длинномерной лопатки компрессора).

**Обсуждение результатов.** Среди опробованных растворителей наиболее приемлемым по комплексу показателей (экономичность, время растворения, коэффициент использования, экологичность, коэффициент соотношения объем модели – объем растворителя) оказался растворитель № 646, для которого применили четыре разных расходных коэффициента, определяющих соотношение «объем полости модели / объем растворителя»: 5, 3, 2, 1 (рис. 3).

После проведенных экспериментов определи-



**Рис. 3.** Значения оптимального расходного коэффициента (объем полости модели / объем растворителя) для разных объемов моделей: 1 – избыточный; 2 – оптимальный

ли, что при значениях коэффициента 5 и 3 процесс растворения проходит удовлетворительно, но за счет избытка растворителя наблюдается его взаимодействие с этилсиликатом и осыпание облицовочного слоя, что, естественно, снижает прочность формы.

Оптимальным соотношением для форм объемом 1000...1500 см³ оказались расходные коэффициенты 1÷2, а для форм объемом 3000 см³ – коэффициенты 2÷3, выбор значений которых зависит от конфигурации отливки, определяющей площадь реакционной поверхности.

Выполненные исследования показали, что образующийся вязкий гель полностью пропитывает облицовочные слои формы. На воздухе гель затвердевает и со временем практически полностью застывает, превращаясь в прозрачную массу – результат химического взаимодействия пенополистирола с растворителем. Термический отжиг оболочки с жидким гелем по режиму:  $T_{\text{прокалки}} = 450...650$  °С приводил к оседанию на внутренних поверхностях формы продуктов термического разложения гелеобразной фракции. После заливки металла в такие формы по границе контакта металл-форма наблюдалась значительная по толщине зона газовой пористости (до 100 мкм, рис. 4, а), причиной чего являлось интенсивное

газовыделение в момент заливки металла. Этот недостаток устранили за счет изменения конструкции форм, а именно: на дне формы установили промывники, давшие возможность полностью удалить гелеобразную фракцию даже при однократной процедуре промывки растворителем № 646. Затем проводили двухэтапное просушивание форм: 48 ч на воздухе при  $T = 20$  °С с последующей сушкой 3 ч при  $T = 300$  °С в термической печи типа СВЕН. Высокотемпературную термообработку проводили при  $T = 900$  °С, 6 ч на воздухе в той же термической печи без промежуточного охлаждения. Визуальный осмотр оболочек (10 шт) и последующее использование форм для заливки жаропрочных сплавов марки ЧС 104, легированного рением и танталом, показали высокую трещиностойкость и прочность форм. Проведенный металлографический и микрорентгеноспектральный анализы показали значительное уменьшение глубины контактной зоны металл-форма. Обоеднение основными легирующими элементами (хром, титан, алюминий) не обнаружено, газовую пористость не наблюдали (рис. 4, б). Отсутствие поверхностных дефектов отливки позволило снизить затраты на механическую обработку деталей. Из залитых 10 форм разного объема растрескивание обнаружили у одной – в области перехода стояк-чаша. В дальнейшем выявленный недостаток предполагается устранить за счет увеличения количества облицовочных слоев или введением модификаторов в формовочную смесь.

Ранее подобные исследования проводили для сплавов марок ЧС 70 (ХН58КВТЮМБЛ) и ЧС 88У (ХН60КМЮВТ) [5].

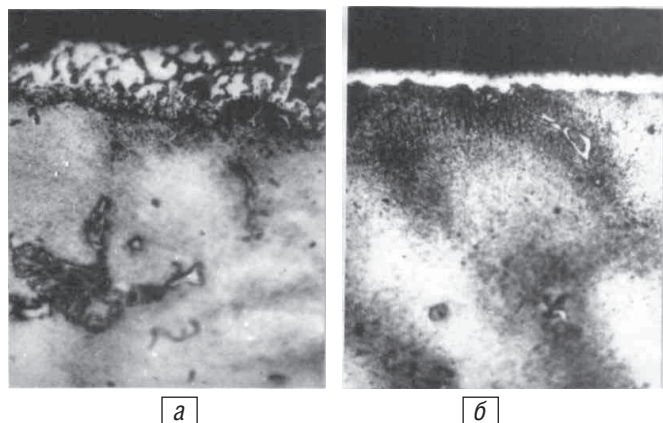
По разработанным режимам, опробованным в лабораторных условиях ФТИМС НАН Украины, провели дополнительный комплекс работ и изготовили опытную партию керамических форм по новой технологии в условиях ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект».

С целью дальнейшей корректировки режимов технологического процесса в настоящее время предполагается провести работы по улучшению чистоты поверхности отливки путем дополнительного нанесения слоя воскоподобной модельной массы на пенополистироловую модель и опробовать этот процесс для различных марок сплавов и типомodelей отливок.

### Выводы

1. Для получения отливок деталей сложного геометрического профиля опробовали способ литья по пенополистироловым растворимым моделям. Проблеме минимизации насыщения углеродом контактной зоны металл-форма при получении отливок из жаропрочного сплава марки ЧС104 (ХН57КТВЮМБЛ) при заливке в вакууме в керамические формы решили за счет подбора соответствующего растворителя № 646 пенополистироловой модели и последующим удалением продуктов деструкции.

2. Экспериментально определили расходные коэффициенты в зависимости от объема и конфигурации моделей. Для обеспечения наиболее полного удаления продуктов деструкции пенополистирола из

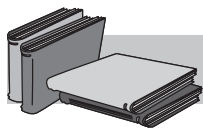


**Рис. 4.** Зона контакта металл-форма при получении отливок методом растворения пенополистироловых моделей, ×400: после термической обработки (а); после термической обработки и процедуры промывки (б)



полости оболочки формы экспериментально определили температурно-временные параметры процесса растворения и прокалки форм, включающие двух-этапное просушивание форм и высокотемпературную термообработку.

3. С помощью проведенного металлографического и микрорентгеноспектрального анализов показали значительное уменьшение глубины контактной зоны металл-форма, отсутствие газовой пористости и обеднения основными легирующими элементами (хромом, титаном, алюминием), что дало возможность снизить затраты на механическую обработку отливок.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Шуляк В. С. Литье по газифицируемым моделям. – М.: НПО «Профессионал», 2007. – 408 с.
2. Максютя И. И., Нейма О. В. Перспективы получения оболочковых керамических форм по удаляемым моделям: Тез. докл. // IX Междунар. науч.-практ. конф. Литье-2013. – Запорожье, 2013. – С. 126-127.
3. Шинский О. И. Новое в теории и практике литья по газифицируемым моделям // Литейн. произв.-во. – 1998. – № 7. – С. 23-26.
4. Клемчук Л. В., Бойко А. В., Антипенко В. Ф. Геометрическая точность и качество отливок, изготовленных по пенополистироловым моделям // Литье по газифицируемым моделям. – К.: ИПЛ АН УССР, 1975. – С. 98-105.
5. Разработка нового технологического процесса получения оболочковых керамических форм по удаляемым моделям / В. М. Симановский, И. И. Максютя, Ю. Г. Квасницкая, Ю. Ф. Аникин // Процессы литья. – 2006. – № 4. – С. 66-71.
6. Инструкция И ЖАКИ. 105,509-2001: Сплавы жаропрочные литейные для лопаток газовых турбин (пасп. сплава ЧС 104ВИ).
7. Симановский В. М. Теоретические основы получения литейных форм и стержней на основе модифицированной керамики // Процессы литья. – 2001. – № 2. – С. 41-47.
8. Тупчиенко В. И. Разработка и внедрение новых направлений процесса литья по растворяемым пенополистироловым моделям: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Краматорск, 1984. – 224 с.

### Анотація

*Шинський О. Й., Максютя І. І., Нейма О. В.*

**Особенности застосування пінополістиролових моделей, що розчиняються для отримання складнопрофільних деталей ГТД**

*Проведено дослідження технологічного процесу виготовлення ливарних керамічних форм способом видалення пінополістиролової моделі при розчиненні її органічними розчинниками. Визначено температурно-часові параметри процесу розчинення та видалення продуктів деструкції для групи розчинників у формах різних об'ємів. Встановлено, що відсутність поверхневих дефектів виливків, отриманих цим способом, знижує витрати на механічну обробку литих деталей, і це суттєво збільшує коефіцієнт використання дорогих жароміцних сплавів.*

### Ключові слова

*модель, що розчиняється; жароміцний сплав; температурно-часові параметри; продукти деструкції; керамічні форми*

### Summary

*Shinsky O. I., Maksyuta I. I., Neima A. V.*

**Features of the application of soluble cellular polystyrene models for getting complex GTE parts**

*Proposed and tested manufacturing process of casting ceramic molds way to remove the polystyrene model of the dissolution of her organic solvents by the authors. As a result of studies for the solvents defined temperature and time parameters of dissolution and removal of the degradation products to form different volumes. No surface defects of castings obtained in this way possible to reduce the cost of machining of cast parts that substantially increase the utilization of expensive superalloys.*

### Keywords

*dissolve model, superalloy, temperature and time parameters, destruction products, ceramic mold*

Поступила 21.10.13