



УДК 669.245.018.45

Поступила 08.08.2016

ПОЛУЧЕНИЕ СЛОЖНО-ПРОФИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ КОМБИНИРОВАННЫМ СПОСОБОМ ЛИТЬЯ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ И ВЫЖИГАЕМЫМ МОДЕЛЯМ

THE PRODUCTION OF COMPLEX PROFILE DETAILS BY COMBINED METHOD OF LOST-WAX CASTING AND OF CONSUMABLE PATTERN MODELS

О. И. ШИНСКИЙ, И. И. МАКСЮТА, Ю. Г. КВАСНИЦКАЯ, Е. В. МИХНЯН, А. В. НЕЙМА, Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, г. Киев, Украина, бульвар Вернадского, 34/1. E-mail: teleportik123@ukr.net

O. I. SHINSKY, I. I. MAKSYUTA, Yu. G. KVASNITSKAYA, E. V. MIKHNYAN, A. V. NEYMA, Physical and Technological Institute of Metals and Alloys of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine, 34/1, Vernadskogo ave. E-mail: teleportik123@ukr.net

Разработанный и опробованный авторами технологический процесс получения сложно-профильных отливок из жаропрочного сплава марки ХН57КТВЮМБЛ комбинированным способом литья по выплавляемым восковым (литниковая система) и выжигаемым пенополистироловым моделям в оболочковые формы из комплексно-модифицированной керамики способствует снижению трещинообразования форм за счет правильно подобранного температурно-временного режима отжига формы с моделью. Кроме того, позволяет получить сложно-профильные отливки с минимизацией припуска на механическую обработку деталей, повысить их геометрическую точность и снизить шероховатость.

The technological process of receiving figurine castings of a heat resisting alloy HN57KTVYuMBL brand developed and tested by authors a combined method of oflost-wax casting (pouring gate system) and of consumable expanded polystyrene pattern in shell forms kompleks modify ceramics promotes decrease in crack formation of forms at the expense of correctly picked up temperature and time mode of annealing of a form with model. Besides this method allows to receive figurine castings with minimization of an allowance for machining of details, to increase their geometrical accuracy and to lower a roughness.

Ключевые слова. Жаропрочный сплав, комплексно-модифицированная керамика, выжигаемая модель, пенополистирол, продукты деструкции, комбинированный способ литья.

Keywords. Heat-resisting alloy, kompleks modify ceramics, consumable pattern, expanded polystyrene, destruction products, a combined method of casting.

Введение

В последние годы традиционной технологией, используемой на предприятиях энергомашиностроения для получения литых сложно-профильных деталей, в частности лопаток газотурбинных двигателей (ГТД), является литье в многослойные оболочковые формы с выплавляемыми воскодержущими моделями (метод ЛВМ).

Однако из-за низкой (около 30 °С) температуры размягчения воскодержущей модельной массы, ее значительной объемной и линейной усадки и высокого коэффициента расширения при нагревании этот метод имеет ограниченные возможности при возрастании массы отливок. Кроме того, этот процесс достаточно трудоемок и экологически неблагоприятен. Как показывает практика последних десятилетий, технологически и экономически целесообразным является применение способа литья с использованием газифицированных моделей из полимеров (ЛГМ), в том числе пенополистирола (ППС). Такой способ литья дает возможность получить повышение точности геометрических размеров отливок, снижение трудозатрат, в том числе на оборудование и материалы, сокращение отходов производства. Но для жаропрочных сплавов, применяемых в качестве материалов для газотурбинных двигателей, применение га-

зифицируемых моделей может быть причиной чрезмерного науглероживания контактного слоя «металл-форма», что связано с взаимодействием расплава, заполняющего форму, с продуктами неполной деструкции ППС-модели [1–3]. Кроме того, при изготовлении ответственных деталей типа рабочих и сопловых лопаток ГТД, требующих высокой размерно-массовой точности, восковые модели вследствие низкой температуры плавления и повышенной усадки для габаритных отливок, не обеспечивают заданную регламентом точность [4]. Таким образом, для устранения перечисленных выше недостатков методов ЛГМ и ЛВМ предлагается полное либо предварительное (частичное) растворение моделей, или их выжигание.

В ФТИМС НАН Украины была разработана методика и проведена большая серия экспериментов по качественному и количественному анализу как процесса растворения ППС-моделей разного типа, так и термической деструкции в условиях, близких к реальной форме, в зависимости от температуры металла, скорости заливки формы и материала модели [5, 6]. Таким образом, технологические проблемы получения качественных отливок при применении удаляемых ППС-моделей требуют решения этих задач для каждой конкретной детали и вида используемых материалов.

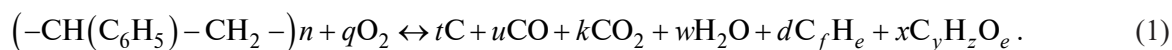
Целью представленных авторами исследований является разработка процесса литья и изготовления форм из комплексно-модифицированной керамики на основе корунда по выжигаемым моделям из ППС при получении сопловых лопаток компрессора низкого давления (КНД) силовой турбины UGT6000 для привода нагнетателей, электронагревателей и силовых движителей из нового жаропрочного сплава ЧС-104 ВИ (ХН57КТВЮМБЛ) с повышенным содержанием активных тугоплавких элементов. Огнеупорным материалом, в частности для многослойных оболочковых форм, служила комплексно-модифицированная термо- и химически более стойкая огнеупорная смесь на основе корунда. Как было приведено в [5, 7], технология повышения термической и химической стойкости огнеупоров является предметом многолетних совместных исследовательских разработок НПКГ «Зоря»-«Машпроект» и ФТИМС НАН Украины.

Состояние вопроса. Процесс термического разрушения пенополистирола по законам термодинамики зависит как от мощности источника тепловой энергии, так и от теплофизических констант самого вещества модели (теплоемкости, теплопроводности), определяющих скорость нагрева поверхности и распространения тепла в объеме модели.

Анализ научной литературы показывает, что механизм структурно-фазовых изменений для разных температурно-временных режимов, происходящих в полистироле под воздействием высоких температур, можно представить следующим образом [1, 3, 8]. Подвод тепла к ППС в процессе тепловой обработки приводит к критическому или близкому к нему состоянию, и дальнейший обогрев его вызывает усадку материала и перевод в вязкотекучий гель [1, 8, 9] (рис. 1). Так, согласно законам термодинамики [1], любая система, состоящая из множества подвижных частиц или их комплексов, стремится к состоянию, которому в данных термодинамических условиях соответствует минимальный запас свободной энергии.

Для такого состояния характерна максимальная подвижность цепей макромолекул (звеньев) вплоть до их взаимного перемешивания и сцепления друг с другом. Считая, что вероятность существования полимера в таком состоянии стремится к нулю при $T \rightarrow T_{кр}$ можно оценить состояние его структуры как суперметастабильное – любое повышение температуры приводит к быстрому разрыву цепей доменов и распаду полимера в целом, т. е. полимер приводится к такой энергетической точке, когда любое изменение температуры сопровождается изменением в ту или другую сторону агрегатного состояния полимера: при $T \rightarrow T_{кр}$ – к его распаду, при $T < T_{кр}$ – к стеклообразному состоянию.

Учитывая сказанное выше, процесс термического разрушения пенополистирола при выжигании моделей в обычной печной атмосфере можно представить в виде [9]:



Как видно из реакции (1), процесс термоокислительного распада пенополистирола сопровождается образованием сложной смеси химических соединений как газообразных, так и в виде зольного остатка.

При совершенствовании технологии получения фасонных отливок повышенной геометрической точности из разработанных жаропрочных сплавов авторы данной работы поставили задачу – определение оптимальных температурно-временных параметров процесса удаления ППС-моделей и продуктов деструкции из оболочковых форм способом одно- или двухэтапного выжигания, решая при этом задачу сохранения основных этапов технологического процесса изготовления форм, принятых для конкретной номенклатуры отливок на предприятиях машиностроения.

Материалы, практическая реализация и результаты исследований. В практике современного литейного производства, кроме нагрева в сушильной печи, встречаются также такие способы выжигания модели из формы, как использование ацетиленокислородного пламени, а также струей кислорода. Но выжигание ацетиленокислородным пламенем до настоящего времени не дало положительных результатов и более технологичным, по мнению автора [8], оказался способ выжигания моделей направленной струей кислорода. Стояк (выпор) из пенополистирола поджигали и в очаг горения при помощи резака или трубки направляли струю кислорода. Модель быстро выгорала, причем продолжительность удаления модели зависела от ее объема и составляла обычно от 1 до 5 мин. Так как выжигание сопровождалось обильным выделением дыма, этот процесс необходимо проводить под вытяжным зонтом.

В ФТИМС НАН Украины был запатентован более рациональный способ использования повышенных температур для удаления ППС-моделей: термоизвлечение ППС-модели с помощью нагретой проволоки [10]. При этом применяется не полностью процесс выжигания ППС-модели, а используется низкотемпературный этап, приводящий к термокомпактированию, т. е. усадке модели, что дает возможность ее дальнейшего механического извлечения на стадии частичного оплавления. Таким образом, удается избежать накопления зольного остатка от сжигания ППС-модели в облицовочных слоях формы и возможного насыщения углеродом приповерхностной зоны отливки. Авторами работы [5] ранее была опробована возможность, в случае необходимости, применения дополнительной операции, включающей предварительное растворение зольных остатков ППС в полости формы органическими растворителями с последующим сливом через специальное устройство, но это отрицательно сказывается на трудоемкости и экономичности техпроцесса.

В качестве критериев оптимизации процесса выжигания при выборе того или иного типа ППС нами использовались следующие характеристики моделей: кажущаяся плотность, шероховатость поверхности, количество летучих веществ, количество негазифицируемого остатка при различных условиях обжига форм (зольность). Для проведения исследований использовали образцы нескольких типов ППС, применяемых в литейном производстве для изготовления моделей (табл. 1). Модели первого типа изготавливали двух размеров: объемом 34 и 103 см³ из готового блочного пенополистирола марки ПСБ-25 (EPS-EN13163) по ДСТУ Б EN 13163–2013 плотностью 25 кг/м³. Второй тип образцов аналогичных размеров изготавливали из значительно более прочного (табл. 1) экструдированного ППС марки 4000 CS (XPS СТО 72746455-3.3.1-2012) плотностью 35 кг/м³, имеющего однородную структуру из закрытых герметических ячеек, содержащих воздух. Этот тип ППС благодаря плотной структуре, как показал предыдущий опыт, обеспечивает большую жесткость и пониженную шероховатость элементов модели, при этом является экологически чистым.

Таблица 1. Характеристики разных типов пенополистирола

Параметр	Вид пенополистирола, марка					
	блочный, марка		экструдированный, марка			
	ПСБ-15	ПСБ-25	Carbon eco	Carbon solid 500	4000 CS	Carbon solid 700
Плотность, кг/м ³	До 15	15–25	26–32	Не менее 36	35	Не менее 50
Средний размер гранул, мм	3,0–3,5	2,0–2,5	–	–	–	–
Количество гранул на 1 площадь поверхности (3,6 см ²), шт.	40–45	80–85	–	–	–	–
Прочность на сжатие при 10 % линейной деформации, МПа	0,05	0,10	0,25	0,16	0,50	0,70

При небольшой кажущейся плотности моделей (в пределах 8–25 кг/см³) и остаточном содержании порообразователя не выше 1,5%, возможно совместить операции удаления моделей с обжигом форм без их разрушения из-за подвспенивания моделей. Задача минимизации газовых и сажистых выделений была решена подбором технологических режимов обжига форм с дополнительным дожиганием продуктов деструкции при высокотемпературном обжиге.

Выбор температуры полного выжигания авторы данной статьи проводили с учетом результатов, приведенных в [1] как «способ *Replicast-CS (Shell moulding refractory)*».

Перед испытанием образцы измеряли в трех точках с погрешностью не более 0,1 мм. Для взвешивания образцов с целью определения истинной плотности ρ (кг/м³) использовали весы лабораторные электронные 4-го класса модели ВЛ Э134 завода «Госметр» (г. Санкт-Петербург).

В качестве опытного сплава при проведении лабораторных испытаний по выбору температурно-временных режимов выжигания для форм на жидкостекольном связующем использовали более дешевую в сравнении с жаропрочными сплавами на никелевой основе сталь марки 18Х2Н4МА. Для отработки технологии при получении деталей ГТД (сопловых лопаток) были выбраны 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 – 0,10% С – 20,0% Cr – 2,5% Al – 3,5% Ti – 10,2% Co – 0,05% Zr – 0,5% Fe, в которую 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 для лопаток судовых и энергетических ГТД. Выбор сплава был обусловлен широкой востребованностью этой марки на предприятиях газотурбостроения. Как показали исследования, проведенные методом высокотемпературного дифференциального термического анализа (ВДТА) на установке ВДТА-8М с точностью $\pm 5^\circ\text{C}$, такие сплавы имеют температуру плавления в области 1370°C .

С целью повышения эксплуатационных характеристик керамических материалов для используемых оболочковых литейных форм была предложена концепция применения комплексного модифицирования огнеупорных смесей на основе корунда металлическими порошками алюминия и кремния, что приводит к возрастанию прочности комплексно-модифицированной керамики в 1,5–2,5 раза (предел прочности на изгиб 6–8 МПа при 20°C ; 3,5–4,5 МПа при 1500°C) [4, 5]. 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, а в качестве формовочной композиции использовали разработанную комплексно-модифицированную смесь на основе корунда.

Согласно известной температурной зависимости фазовых превращений в пенополистироле [1], термоусадочные изменения ППС становятся заметны при температуре выше 100°C и усиливаются к 160°C (рис. 1). Первичный этап выжигания из готовых форм (образцы с предварительно растворенными моделями и образцы без растворения) выполняли в камере лабораторного сушильного электрошкафа СНОЛ 67/350 с диапазоном автоматического регулирования температуры в интервале $50\text{--}350^\circ\text{C}$. Формы в течение 1 ч подвергали тепловому воздействию при постепенном повышении температуры от 20 до 150°C с целью инициации первичного газовыделения и начального этапа деструктивных изменений. При нагревании фиксировали резкое уменьшение объема ППС-моделей с первых же минут и соответственно увеличивалась их объемная плотность. Для постоянного контроля температуры дополнительно через отверстие в крышке камеры печи нагрева вводили горячий спай термопары типа хромель-алюмель. Спай термопары снабдили специальным приспособлением, позволяющим фиксировать его в любой точке пространства, как в объеме формы, так и в рабочей камере печи. Наблюдали, что при нагреве ППС обеих марок до температуры $80\text{--}85^\circ\text{C}$ он переходит в высокоэластичное состояние и увеличивается в объеме за счет внутреннего давления паров порообразователя, при дальнейшем нагреве до 150°C постепенно переходит в вязкотекучее состояние.

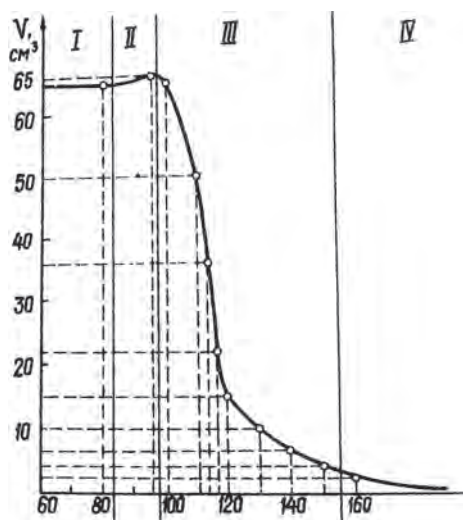


Рис. 1. Температурная зависимость изменения объема пенополистироловой модели в керамической форме

Однако при обжиге формы на ее внутренней поверхности могут выявляться специфические дефекты, расположенные в местах скопления расплавленного ППС. Причиной появления данных дефектов может быть отрыв микрочастиц керамики от поверхности формы при расплавлении моделей в процессе обжига форм. Такой вид брака возможно сократить при применении более прочных видов ППС-моделей с шероховатостью поверхности не ниже 6-го класса по ДСТУ ГОСТ 25142:2009 (ГОСТ 2789-73). Исходя из этого, для предотвращения возникновения описанных выше дефектов авторами предложено комбинированное использование способа ЛВМ и выжигания. При этом способе литниковая система, не требующая повышенной размерной точности, с целью минимизации используемой массы ППС для уменьшения сажистого осадка выполнялась из воскодержащей модельной массы КС-5А, разработанной фирмой «Карион» (г. Днепропетровск), в то время как формы для деталей изготавливаются с помощью ППС-моделей. Для обеспечения нужной чистоты поверхности керамической

оболочки формы, а соответственно и литой детали модели лопаток перед сборкой окунали в расплавленный парафин марки Т-1 (СТО 00148636-004-2007). Также нами успешно опробовано покрытие из воскоподобной модельной массы Велен 1 и 3%-го раствора канифоли в спирте. При этом на поверхности ППС-модели оседает слой восковой массы от 0,2 мм, что способствует гарантированному припуску на обработку и снижению шероховатости, а также обеспечивает технологический зазор, компенсирующий термическое расширение ППС-модели в процессе выжигания.

При выплавлении модельной восковой массы из литниковой системы, а также с поверхности ППС-моделей принимали меры, чтобы зона оболочки с лопатками из ППС не подвергалась интенсивному нагреву. Для этого на зону блока лопаток нанесли обмотку из теплоизолятора на основе мулитокремнезистого волокна МКРР-130 (использовали маты толщиной ~ 10 мм в два слоя), а затем поместили на разогретый в печи поддон.

На втором этапе, после выплавки модельной массы, блок охладили обдувом воздуха (вентилятором), удалили теплоизолятор и загрузили в термическую печь камерного типа чашей вниз для выжигания ППС-модели согласно режиму: температура загрузки в печь – 20–25 °С, подъем температуры 100 °С/ч с приоткрытой дверью для подсоса воздуха с целью создания окислительной атмосферы. Через 1 ч выдержки при 750 °С охладили блоки с печью до комнатной температуры. Незначительный зольный остаток от выжигания модельной массы удалили с помощью эжектора, а затем промыли (наливом) несколько раз теплой водой. Затем форму высушили в шкафу при температуре 200 °С, загрузили на предварительную прокалку при 850–900 °С в камерную печь на 8–10 ч с последующей заливкой сплавом ЧС-104 ВИ в литейной установке УППФ-2 согласно принятому на предприятии регламенту.

Так, при выполнении нами высокотемпературной фазы выжигания в интервале температур 500–550 °С наблюдалось более интенсивное газовыделение. Предположительно, состав выделившихся газов может соответствовать результатам, полученным авторами работ [1, 3, 8]. Представленный количественный и качественный хроматографический анализ на хроматографе ХЛ-2 выделившихся газов и конденсата (коксовый остаток, сажа) при выжигании пенополистирола марок ПСВ-Л и ПСБ-А плотностью 25 кг/м³ при температуре металла 700, 1300 и 1550 °С. Наличие кислорода в пенополистироле как адсорбированного, так и свободного в порах пенопласта, приводит к окислительной термодеструкции полистирола с образованием СО. По данным хроматографического исследования газа в процессе деструкции полистирола при температуре 800 °С, газ состоит из 25,8% Н₄, 14,6% С₂Н₄, 2,6% С₃Н₆.

Результаты входного визуального контроля отлитых авторами данной работы деталей подтвердили минимизацию взаимодействия внутренней оболочки формы с кристаллизующимся расплавом: керамика формы легко удалялась ударами молотка по прибыльной чаше и стояку, практически не требуя пескоструйной обработки.

Элементы разработанной опытной технологии могут быть использованы в серийном производстве более крупногабаритных лопаток ГТД с высотой профиля пера свыше 300 мм, для которых восковые модели не обеспечивают достаточной прочности при изготовлении формы.

По результатам исследований возможностей применения комбинирования в одном процессе способов ЛВМ и литья по удаляемым ППС-моделям при динамическом нагреве (выжигании) можно выделить следующие преимущества:

- благодаря постепенной усадке материала во время термокомпактирования при выбранных скоростях нагрева формы с моделью удалось избежать интенсивного газовыделения, что могло стать причиной образования трещин керамических слоев, кроме того, изготовление литейной чаши с помощью выплавляемой восковой модели снижает массу ППС, уменьшая, тем самым, возможное количество сажистого остатка;

- исследование качества полученных отливок позволило констатировать как существенное сужение контактной зоны (рис. 2), так и отсутствие поверхностных плен и микропористости; проведенный в режиме сканирования анализ приповерхностной зоны методом МРСА не обнаружил отклонений распределения в ма-

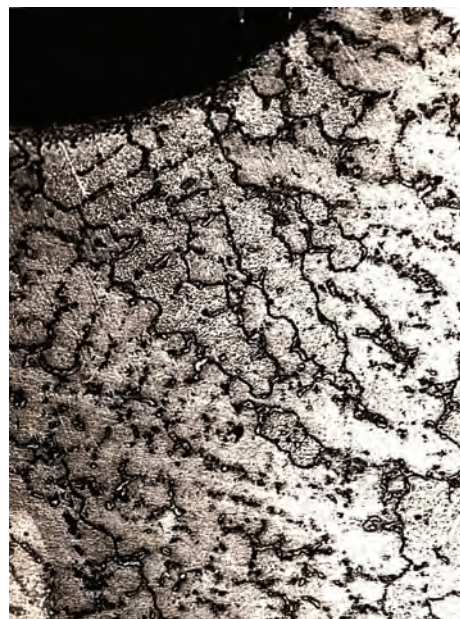


Рис. 2. Микроструктура отливки (перо лопатки ГТД с контактным слоем «металл-форма»), полученной способом комбинированного литья в форму из комплексно-модифицированной керамики, сплав ЧС-104 ВИ. ×500

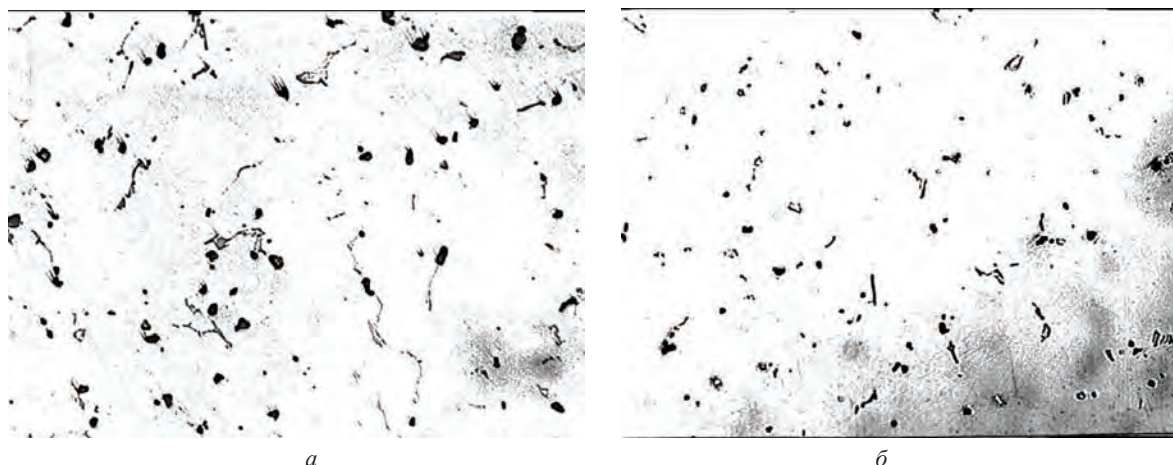


Рис. 3. Неметаллические включения в микроструктуре отливки (лопатка ГТД): *а* – залитого в корундовую форму, применяемую в серийном производстве; *б* – залитого в форму из комплексно-модифицированной керамики. $\times 250$

трице сплава (γ -твердый раствор) и структурных составляющих (γ' -фаза и карбиды) активных легирующих элементов Ti, Al, Cr;

- исследование микроструктуры контактной зоны «металл-форма» показало, что уровень содержания неметаллических включений (нитридов, оксидов) (табл. 2, рис. 3) меньше допустимого регламентными документами, что свидетельствует как об отсутствии взаимодействия расплава с остаточными продуктами деструкции ППС-моделей (сажистый остаток), так и с формой из комплексно-модифицированной керамики.

Таблица 2. Содержание газов и неметаллических включений в контактной зоне «металл-форма» отливок

Сплав	Суммарное количество неметаллических включений, мас. доля, %	Содержание газов, мас. доля %		
		O ₂	H ₂	N ₂
ЧС104 (Ta+Re)	0,0059	0,0047	0,00018	0,0032
	0,0052	0,0035	0,00019	0,0029
Сталь (18Х2Н4МА)	0,0056	0,0031	0,00022	0,0031
	0,0062	0,0026	0,00021	0,0028

Примечание. В числителе – полученные ЛВМ, в знаменателе – полученные комбинированным способом.

Предложенная авторами комбинированная технология изготовления оболочковых форм из комплексно-модифицированной керамики может способствовать как снижению трещинообразования форм, так и уменьшению трудозатрат на механическую обработку деталей за счет повышения их геометрической точности и снижения шероховатости.

Литература

- Шуляк В. С. Литье по газифицируемым моделям. СПб.: НПО «Профессионал», 2007. 408 с.
- Каблов Е. Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технологии, покрытия. 2-е изд. М.: Наука, 2006. 632 с.
- Шинский О. И. Газогидродинамика и технологии литья железоуглеродистых и цветных сплавов по газифицируемым моделям: Дис. ... д-ра техн. наук. Киев, 1997. 481 с.
- Шинский О. И., Максютя И. И., Квасницкая Ю. Г., Михнян Е. В., Нейма А. В. Применение растворяемых пенополистироловых моделей при получении литых деталей газотурбинных установок // Литье и металлургия. 2016. № 1. С. 46–52.
- Шинский О. И., Максютя И. И., Нейма А. В., Квасницкая Ю. Г., Михнян Е. В. Получение деталей ГТД в оболочковых формах с растворяемыми моделями // Литейное производство. 2015. № 5. С. 19–25.
- Максютя И. И., Квасницкая Ю. Г., Нейма А. В., Михнян Е. В., Тихонова О. А. Выжигаемые ППС-модели как перспективный метод улучшения качества литых деталей ГТД // Процессы литья. 2015. № 3. С. 47–56.
- Максютя И. И., Квасницкая Ю. Г., Верховлюк А. М., Мьяльница Г. Ф. Повышение ресурсных возможностей газотурбинных установок путем оптимизации легирующего комплекса // Процессы литья. 2016. № 4. С. 46–51.
- Литье по выжигаемым моделям. Хабаровск: Изд-во Хабаровского гос. техн. ун-та, 2002. 58 с.
- Литье по газифицируемым моделям. Киев: Изд-во ИПЛ АН УССР, 1975. С. 125–133.
- Пат. № 91224, Украина, МПК (2014) В22С 9/02. Способ формовки по разовым моделям / О. И. Шинский, В. С. Дорошенко, А. В. Нейма. Опубл. 25.06.2014. Бюл. № 12.

References

1. **Shuljak V. S.** *Lit'e po gazificiruemym modeljam* [Lost foam casting]. Sankt-Petersburg, NPO Professional Publ., 2007. 408 p.
2. **Kablov E. N.** *Litye lopatki gazoturbinyh dvigatelej: splavy, tehnologii, pokrytija* [Cast vanes of gas turbine engines: Alloys, Technologies, Coatings]. 2nd ed. Moscow, Nauka Publ., 2006. 632 p.
3. **Shinskij O. I.** *Gazogidrodinamika i tehnologii lit'ja zhelezouglerodistyh i cvetnyh splavov po gazificiruemym modeljam*. Diss. dokt. tehn. nauk [Gas and hydrodynamics and technology casting of iron and non-ferrous alloys by gasified models. Dr. techn. sci. diss.]. Kiev, 1997. 481 p.
4. **Shinskij O. I., Maksjuta I. I., Kvasnickaja Ju. G., Mihnjan E. V., Nejma A. V.** Primenenie rastvorjaemyh penopolistirolovyh modelej pri poluchenii lityh detalej gazoturbinyh ustanovok [The application of models of polystyrene which dissolve for obtaining cast parts gas turbines]. *Lit'e i metallurgija = Foundry Production and metallurgy*, 2016, no. 1, pp. 46–52.
5. **Shinskij O. I., Maksjuta I. I., Nejma A. V., Kvasnickaja Ju. G., Mihnjan E. V.** Poluchenie detalej GTD v obolochkovykh formah s rastvorjaemymi modeljami [The technological problems of getting GTE parts in shell molds with dissolved models]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry production*, 2015, no. 5, pp. 19–25.
6. **Maksjuta I. I., Kvasnickaja Ju. G., Nejma A. V., Mihnjan E. V., Tihonova O. A.** Vyzhigaemye PPS-modeli kak perspektivnyj metod uluchshenija kachestva lityh detalej GTD [The polystyrene foam models that burned as a promising method for improving the quality of cast parts GTE]. *Processy lit'ja = Casting process*, 2015, no. 3, pp. 47–55.
7. **Maksjuta I. I., Kvasnickaja Ju. G., Verhovljuk A. M., Mjal'nica G. F.** Povyshenie resursnyh vozmozhnostej gazoturbinyh ustanovok putem optimizacii legirujushhego kompleksa [Increased resource capacity gas turbines by optimization of alloying complex]. *Processy lit'ja = Casting process*, 2016, no. 4, pp. 46–51.
8. **Grigor'ev V. M.** *Lit'e po vyzhigaemym modeljam: Uchebnoe posobie dlja studentov special'nosti litejnoe proizvodstvo chernyh i cvetnyh metallov* [Casting by models that burned: textbook for students of a specialty foundry of ferrous and nonferrous metals]. Khabarovsk, Habar. gos. tehn. un-t Publ., 2002. 58 p.
9. **Shuljak V. S. e. a.** *Lit'e po gazificiruemym modeljam* [Lost foam casting]. Kiev, IPL AN USSR Publ., 1975, pp. 125–133.
10. **Shinskij O. I. e. a.** *Sposob formovki po razovym modeljam* [The method forming by one-off model]. Patent UA, no. 91224, 2014.