

О. И. Шинский, д-р техн. наук, проф., зав. отделом

И. И. Максютя, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.

Ю. Г. Квасницкая, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.

А. В. Нейма, мл. науч. сотр.

Е. В. Михнян, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: mixnyan@ukr.net

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ПОЛУЧЕНИЕ ЛОПАТОК ГТУ ИЗ НОВОГО ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА В КЕРАМИЧЕСКИХ ФОРМАХ ПО УДАЛЯЕМЫМ ППС–МОДЕЛЯМ

Исследованы возможности применения способа литья деталей газотурбинных двигателей (ГТД) из нового разработанного жаропрочного сплава по растворимым пенополистироловым моделям в оболочковые комплексномодифицированные керамические формы. Для группы растворителей определены параметры процесса растворения и удаления разных типов ППС. Показано снижение шероховатости поверхности и отсутствие обеднения контактного слоя отливка–форма, что позволило получить детали с заданным уровнем эксплуатационных характеристик при снижении затрат на механическую обработку.

Ключевые слова: жаропрочный сплав, модифицированные керамические формы, растворимая модель, пенополистирол, продукты деструкции, кинетические параметры.

Досліджено можливості використання способу лиття деталей газотурбінних двигунів (ГТД) із нового розробленого жароміцного сплаву за допомогою пінополістиролових моделей, що розчиняються, в оболонкові комплексномодифіковані керамічні форми. Для групи розчинників визначено параметри процесу розчинення і видалення різних типів ППС. Показано зниження шорсткості поверхні і відсутність збіднення контактного шару виливок–форма, що дозволило отримати деталі із заданим рівнем експлуатаційних характеристик при зниженні затрат на механічну обробку.

Ключові слова: жароміцний сплав, модифіковані керамічні форми, модель, яка розчиняється, пінополістирол, продукти деструкції, кінетичні параметри.

The possibilities of using casting on dissolvable expanded polystyrene (EP) models into shell complex-modified forms of the developed heat-resistant alloy intended for obtaining directionally crystallized GTE parts, including working blades, are examined. For the group of solvents the parameters of the process of dissolution and removal of different types of EP are determined. It is shown a reduction in roughness, absence of depletion of the contact layer of casting - a form, which made it possible to obtain parts with a given level of performance characteristics and reduce the cost of machine processing.

Keywords: superalloy, ceramic mold, dissolve model, polystyrene, destruction products, kinetic parameters.

Интеграция разработки новых конструкционных материалов для получения литых деталей ответственного назначения и совершенство технологических процессов формообразования может являться базой существенного повышения качества отливок.

Во ФТИМС НАН Украины в течение последних десятилетий при осуществлении научных программ в рамках единой технологической схемы были проведены исследовательские работы по оптимизации и разработке новых композиций жаропрочных сплавов для рабочих и сопловых лопаток ГТУ и керамических огнеупоров для литейной оснастки, оформлены многочисленные патенты на соответствующие разработки.

Так, состав серийного жаропрочного сплава CM88Y был обновлен с целью повышения основной эксплуатационной характеристики – длительной прочности, как для равноосных деталей, так и для отливок с ориентированной структурой путем введения в легирующий комплекс высокотемпературных элементов рения, тантала и оптимизации процесса направленной кристаллизации [1–3].

Проведенные исследования, направленные на достижение синергетического эффекта совместного влияния рения и тантала, способствовали, согласно данным высокотемпературного дифференциального термического анализа (ВДТА), как повышению температуры растворения основной упрочняющей γ' -фазы, так и $T_{\text{солидус}}$, что положительно сказалось на жаропрочности, особенно в состоянии направленной кристаллизации (НК) [2]. Преимущественное растворение рения в аустенитной матрице сплава понизило скорость диффузионных процессов, тем самым тормозя скорость коагуляции и растворения упрочняющей γ' -фазы, что положительно сказалось на высокотемпературной ползучести. Кроме того, согласно [4, 5], сплавы на основе никеля и кобальта, легированные танталом, отличаются высокой стойкостью к окислению и высокотемпературной коррозии. Вероятно, подавляющее образование карбидов MC-типа на базе титана при введении активного карбидообразователя, которым является тантал, приводит к тому, что большая часть углерода не тратится на карбиды Cr_{23}C_6 и хром остается в аустенитной матрице, повышая коррозионную стойкость материала.

Были определены физико-механические свойства и длительная прочность в диапазоне температур 20–900 °С, как в равноосном, так и в ориентированном состоянии для образцов разработанного сплава, полученных согласно техническим параметрам процессов направленной кристаллизации (табл. 1). Заготовки были термообработаны по эмпирически выбранным режимам, исследована их коррозионная стойкость в лабораторных условиях, в том числе на стендах в продуктах сгорания топлива [1–3, 6]. Установлено, что для образцов разработанного состава показатели всех вышеперечисленных эксплуатационных характеристик превышают аналогичные показатели сплава серийного состава CM88Y.

Таблица 1

**Основные параметры направленной кристаллизации
для сплава оптимального состава**

Тип установки	Температура, °С		Задержка движения формы с металлом, мин	Скорость движения формы с металлом, мм/мин	Градиент температуры на фронте затвердевания сплава, К/см
	формы	металла			
УВНК-8П	1450–1500	1550–1570	2–3	20–22	45–50
	1450–1500	1550–1570	2–3	8–10	35–45
	1450–1500	1550–1570	2–3	5–7	25–30
	1450–1500	1550–1570	2–3	2–3	25–30

На оптимальный состав с прецизионным легированием тугоплавкими металлами (%мас.): Ni основа – 0,04–0,07; C – 12,3–13,2; Cr – 3,0–3,5; Al – 1,8–2,3; Ti – 6,8–7,5; Co – 0,03–0,05; Zr – 0,45–0,50; Fe – 0,9–1,4; Mo – 6,8–7,5; W – 0,1–0,5; Nb – 2,5–3,0; Ta – 3,7–4,3 Re был получен патент [3].

Одной из главных задач при внедрении в серийное производство разработанного жаропрочного сплава является оптимизация технологического процесса, обеспечивающего точность, бездефектность отливок такой сложной детали, какой является

лопатка турбины и подбор огнеупорных видов керамики для плавильных тиглей, оболочковых форм, стержней, используемых для ее получения.

С особой сложностью условий формирования отливки литейщика сталкиваются при производстве НК деталей с системой внутренних полостей воздушного охлаждения. Действительно, на этапе сушки, прокалки, удаления моделей и кристаллизации расплава все керамические элементы находятся под воздействием неравномерного температурного поля, что вызывает сложное напряженно-деформированное состояние системы «стержень – оболочка – отливка», которое влияет на пространственную точность лопаток.

Следует иметь в виду, что множество типоразмеров рабочих и сопловых лопаток турбин ставит при освоении новых сплавов и литейной керамики технологические задачи оптимизации процесса производства конкретных деталей.

Исходя из вышесказанного, целью и задачей данного исследования являлось усовершенствование способа получения отливки лопаток компрессора низкого давления ГТД с ориентированной структурой из разработанного сплава типа СМ88У для эксплуатации данного агрегата при повышенных нагрузках и температурах.

Это требует, в свою очередь, повышения термической и химической стойкости керамической оболочки формы, что является также предметом многолетних совместных исследовательских разработок НПКГ «Зоря»–«Машпроект» (г. Николаев) и ФТИМС НАН Украины.

На предыдущих этапах работы были сформулированы основные принципы управления физико-химическими и механическими характеристиками огнеупорных керамических смесей для тиглей, форм, стержней за счет введения в составы добавок-модификаторов в виде дисперсных металлических порошков (алюминия, кремния, бора) [7–9]. Это позволило разработать и запатентовать составы комплексномодифицированных керамических смесей, предназначенных для литья лопаток ГТД, которые обладают более высокой термо- и химической стойкостью по сравнению с традиционными керамическими смесями [10].

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

Однако из-за низкой (около 30 °С) температуры размягчения воскодержательной 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 металлургическая практика последних десятилетий, технологически и экономически целесообразным является применение способов литья по выплавляемым моделям (ЛВМ) и литья с использованием газифицированных моделей (ЛГМ) из полимеров, в том числе, пенополистирола. Такой способ литья дает возможность получить повышение точности геометрических размеров отливок, снижение трудозатрат, в том числе на оборудование и материалы, сокращение отходов производства [11]. Но для жаропрочных сплавов, применяемых в качестве материалов для газотурбинных двигателей, применение газифицируемых моделей может быть причиной чрезмерного науглероживания контактного слоя «металл – форма», что связано с взаимодействием расплава, заполняющего форму, с продуктами неполной деструкции ППС-модели [12–14]. 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. Таким образом, для устранения вышеперечисленных недостатков методов ЛГМ и ЛВМ, предлагается полное либо предварительное частичное растворение моделей, или их выжигание.

В данной статье представлены результаты исследований по оптимизации процесса литья и изготовления форм по растворяемым моделям из ППС разного типа при получении определенного типа лопаток ГТД из разработанного жаропрочного сплава.

Во ФТИМС НАН Украины авторами была разработана методика и проведена большая серия экспериментов по качественному и количественному анализу как процесса растворения ППС–моделей разного типа, так и термической деструкции (выжигания) для жаропрочных сталей и сплавов разного состава [10, 14].

Для изготовления моделей были использованы марки пенополистирола различной плотности и прочности. Следует упомянуть, что в предыдущей работе [12] авторами были получены результаты для пенополистирола плотностью 25 кг/м^3 , который для габаритов деталей, превышающих по высоте пера $350\text{--}400 \text{ мм}$, может не обеспечить достаточную прочность модели. Исходя из этого, следует, что для разного типоразмера лопаток целесообразно использовать ППС повышенной плотности и прочности, так называемый экструдированный ППС марки StyrodurC (Германия), плотность которого у разных производителей варьируется от 25 до 45 кг/м^3 . Сравнительные прочностные характеристики используемых в работе разных типов и марок ППС в зависимости от их плотности приведены в (табл. 2).

Таблица 2

Характеристики разных марок ППС

Характеристики	Тип пенополистирола					
	пенополистирол блочный, марки			пенополистерол экструдированный, марки		
	ПСБ-15	ПСБ-25	ПСБ-35	2500С	2800С	4000 CS
Плотность, кг/м^3	до 15	от 15,1 до 25,0	от 25,1 до 35,1	25	30	35
Прочность на сжатие при 10 % линейной деформации, МПа	0,05	0,10	0,16	0,20	0,30	0,50

Скорость процесса растворения ППС зависит от морфологии пористой структуры модели: распределения пор по размерам, соотношения величины открытой и закрытой пористости. Проведенные исследования показали, что наименьшая открытая пористость (суммарно до $17 \text{ мм}^3/\text{г}$) наблюдается у ПСБ-35, при этом общая открытая пористость составляет $37\text{--}40 \%$. Наибольший объем приходится на поры диаметром от 4000 нм . В образцах ПСБ-25 открытая пористость составляет в среднем $300 \text{ мм}^3/\text{г}$, а общая открытая пористость свыше 50% , что позволяет предполагать значительно большую скорость растворения модели.

Авторами был проведен комплекс экспериментов для определения оптимальных температурно-временных параметров процесса растворения ППС-моделей (объемная скорость $V_{\text{об}}$, расходный коэффициент $K_{\text{расх}}$) в зависимости от типа ППС и с учетом объема модели, а также наиболее полного удаления продуктов деструкции из оболочковых форм. Одновременно решалась задача сохранения основных этапов технологического процесса изготовления форм, принятых для предприятий отрасли.

По комплексу показателей (скорость растворения, расходный коэффициент, возможность повторного применения, экономичность), наиболее приемлемым оказался растворитель № 646, однако по уровню предела допустимых концентраций (ПДК) он достаточно токсичен [15]. Также было опробовано применение таких растворителей, как декалин и тетралин, которые, являясь эффективными растворителями ППС, по уровню ПДК и летучести значительно токсичны.

Исходя из вышеуказанных эмпирических данных и с учетом характеристик

токсичности, для дальнейшего проведения экспериментов были отобраны такие растворители, как живичный скипидар (ГОСТ 1571-82), технический скипидар (ТУ 13-0279856-74-87) и № 646 (ТУ У 24.3-00904996-004-2004).

В качестве формовочной композиции оболочковых форм была взята огнеупорная смесь на основе микропорошка М10 электрокорунда белого марки 24А (ГОСТ 28818-90), модифицированная порошками алюминия (ТУ 48-5-226-82) и кремния Кр-1 (ГОСТ 2169-69), а в качестве связующего – гидролизированный этилсиликат 40 (ТУ 2435-427-057 63441-2004), на который был оформлен патент [6]. Данная формовочная смесь превышает применяемые на практике по основным показателям [16]. 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 ГТУ.

Перед испытанием образцы измеряли не менее, чем 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). Оптимальный расходный коэффициент растворителя выбирали, исходя из результатов предыдущих опытов [15]: 1/3 объема растворителя к единице объема модели. Для каждого образца фиксировали время его полного растворения при весовом равенстве всех образцов и количественном постоянстве свежего растворителя при $T = 20^\circ\text{C}$.

Анализ результатов опытов и их математической обработки, представленных на гистограммах (рис. 1, 2) (длительность растворения, объемная скорость) для разных типов ППС и видов растворителя показывает, что для обоих типов ППС при мелкосерийном производстве возможно использование более экологичного живичного или технического скипидара, которые характеризуются малой скоростью, но высоким ПДК, однако более экономически выгодным является применение последнего. Для крупносерийного, учитывая высокую скорость растворения, более экономичным будет применение растворителя № 646, но который является экологически более опасным.

Альтернативой может явиться способ выжигания ППС-моделей из керамической оболочки.

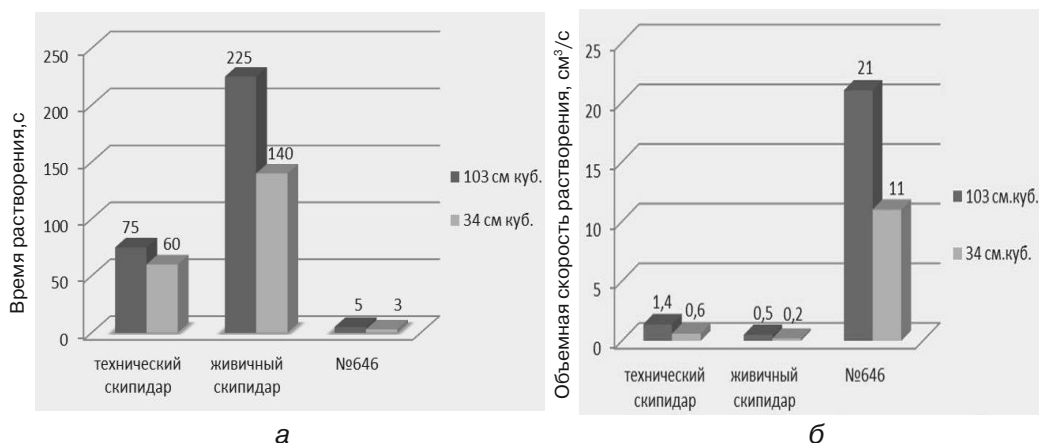


Рис. 1. Влияние видов растворителя на время растворения и объемную скорость блочного ППС; $\rho = 25 \text{ кг/м}^3$ (серое); $\rho = 35 \text{ кг/м}^3$ (черное)

Была поставлена задача определения оптимальных температурно-временных параметров процесса удаления ППС-моделей и продуктов деструкции из оболочковых форм способом одноэтапного или двухэтапного выжигания, при сохранении основных этапов технологического процесса изготовления форм, принятых для конкретной номенклатуры отливок на предприятиях машиностроения.

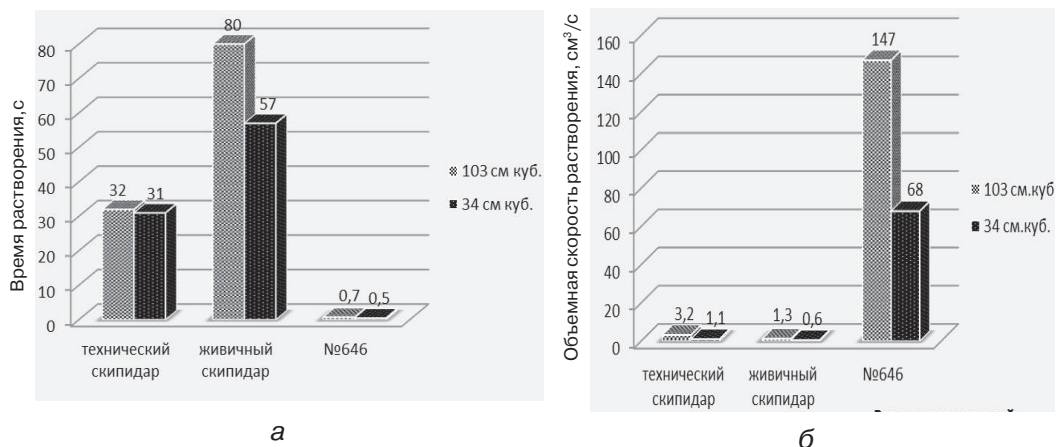


Рис. 2. Влияние видов растворителя на время растворения и объемную скорость экструдированного ППС; $\rho = 25 \text{ кг/м}^3$ (серое); $\rho = 35 \text{ кг/м}^3$ (черное)

Для уменьшения эффекта загрязнения расплавов модельных сплавов во время кристаллизации авторами работы была проведена серия экспериментов по исследованию межфазного взаимодействия расплавов модельных сплавов с перспективными огнеупорными материалами для изготовления форм методом лежащей капли в интервале температур $1400\text{--}1800^\circ\text{C}$, а также путем изучения зоны контакта отливок после заливки форм при температуре 1580°C (температура формы составила 800°C). Зону взаимодействия системы металлический расплав – огнеупорные материалы изучали методами МРСА, Оже-спектроскопии, оптической металлографии, измеряли микротвердость шлифов, которые изготавливались поперек заготовки по методикам, ранее представленным в работе [6]. Исследования показали, что при использовании обычной серийной технологии изготовления формы с использованием гидролизованного этилсиликата, на поверхности формы накапливается оксид кремния, что приводит к значительному обеднению поверхности отливки, в первую очередь, хромом, а также титаном, алюминием. Подтверждением этого явления есть результаты, полученные в [7–9] для жаропрочных никелевых сплавов. В нашем случае глубина зоны обеднения составила, например, для хрома от 30 до 40 мкм, что имеет негативные последствия для уровня как механических, также коррозионных свойств модельных сплавов.

Проведенный металлографический и микрорентгеноспектральный анализы показали значительное уменьшение (с 80 до 20 мкм) глубины контактной зоны металл–форма, не обнаружено обеднения основными легирующими элементами – алюминием, кобальтом, никелем, хромом, вольфрамом, молибденом, титаном, ниобием, снижено содержание газов (кислорода, водовода, азота), то есть практически не наблюдается дефектов приповерхностного слоя в виде зоны газовой пористости (рис. 3, 4).

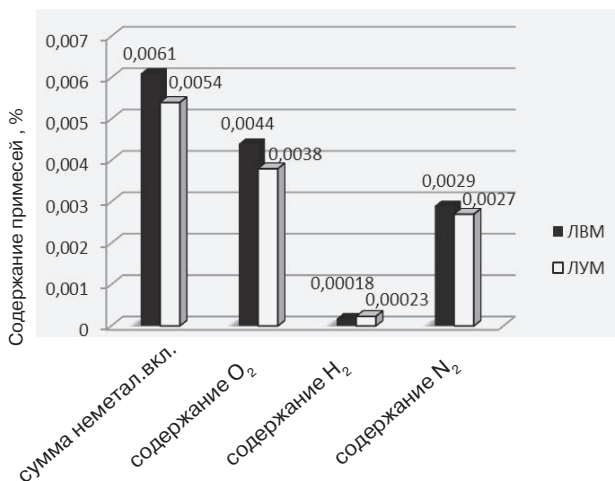


Рис. 3. Сравнительная характеристика чистоты приповерхностной зоны (по содержанию газов) в отливках, полученных методом ЛВМ и ЛУМ для жаропрочного сплава

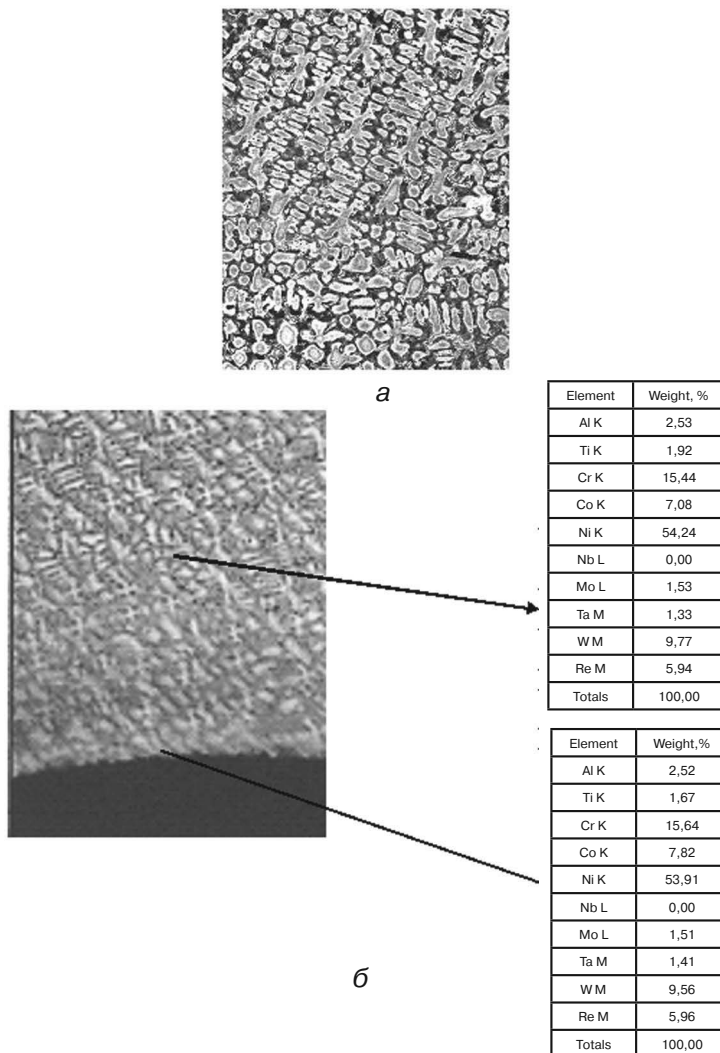


Рис. 4. Металлографические исследования полученных образцов разработанного сплава: а – макроструктура сплава (равноосное состояние), $\times 50$; б – поперечное сечение в состоянии НК (γ - твердый раствор), $\times 200$

Выводы

- Определены термо-кинетические параметры процесса растворения пенополистерола нескольких типов, отличающихся прочностными характеристиками, в различных видах растворителей. Для разных типоразмеров моделей найдены оптимальные для ускорения растворения температурные области.
- Проведенные металлографический и микрорентгеноспектральный анализы показали сужение пограничного слоя металл–форма при отсутствии обеднения прочностными элементами, повышенную геометрическую точность профиля корита, пера и внутренних треков воздушного охлаждения.
- Предложенный метод растворения ППС–моделей при получении оболочковых форм из комплексно-модифицированной керамики позволил получить бесприпусковые по газовому тракту поверхности лопатки, что ведет к увеличению коэффициента использования металла.



Список литературы

1. *Верховлюк А. М.* Фазово-структурна стабільність жароміцного корозійностійкого сплаву для литих робочих лопаток ГТД / А. М. Верховлюк, І. І. Максютя, Ю. Г. Квасницька, Г. П. Мяльниця, О. В. Михнян // *Металознавство та обробка металів*. – 2016. – № 3. – С. 3–9.
2. *Максюта И. И.* Усовершенствование способов получения отливок с ориентированной структурой для рабочих лопаток ГТД / И. И. Максютя, Ю. Г. Квасницкая, Е. В. Михнян // *Процессы литья*. – 2017. – № 4. – С. 66–74.
3. *Квасницька Ю. Г.* Жароміцний корозійностійкий сплав на нікелевій основі для лопаток газотурбінних двигунів / Ю. Г. Квасницька, О. В. Клясс, В. А. Крещенко, Г. П. Мяльниця, І. І. Максютя, О. Й. Шинський // Патент України на винахід № 110529 від 12.01.2016.
4. *Каблов Е. Н.* Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия). – М.: «МИСИС», 2001. – 632 с.
5. *Максюта И. И.* Технологические особенности высокохромистого никелевого сплава, комплекснолегированного рением и танталом. / И. И. Максютя, О. В. Клясс, Ю. Г. Квасницкая, Г. Ф. Мяльниця, Е. В. Михнян // *Современная электрометаллургия*. – 2014. – № 1. – С. 41–48.
6. *Квасницкая Ю. Г.* Повышение стойкости к высокотемпературной коррозии жаропрочных сплавов как резерв возрастания ресурсных возможностей газотурбинных двигателей. / Ю. Г. Квасницкая, И. И. Максютя, Г. Ф. Мяльниця // *Металл и литье Украины*. – 2016. – № 5. – С. 3–7.
7. *Симановский В. М.* Теория та технология модифицирования формовочных смесей для отливок с специальных сплавов: Автореф. дис. д. техн. наук. – Киев: ФТИМС НАНУ, 2008. – 36 с.
8. *Симановский В. М.* Основные требования к формовочным материалам для получения деталей с ориентированной структурой / В. М. Симановский, И. И. Максютя, Ю. Г. Квасницкая, Е. В. Михнян, А. В. Нейма // *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії, збірник наукових праць*. – 2011. – № 4. – С. 139–141.
9. *Сімановський В. М.* Суміш для виготовлення ливарних форм / В. М. Сімановський, Ю. Г. Квасницька, В. Г. Єфімова, Г. В. Єфімов, І. І. Максютя // Патент України на корисну модель № 18889 від 15.11.2006.
10. *Сімановський В. М.* Смесью для изготовления литейных стержней / В. М. Симановский, Ю. Г. Квасницкая, О. И. Шинский, И. И. Максютя, М. О. Сушков, В. Г. Ефимова // Патент України на корисну модель № 82603 від 25.04.2008.
11. *Шинский О. И.* Газогидродинамика и технологии литья железоуглеродистых и цветных сплавов по газифицируемым моделям / О. И. Шинский // Дис. д-ра техн. наук. Киев, 1997. – 481 с.
12. *Шинский О. И.* Особенности применения растворяемых пенополистироловых моделей для получения сложнопрофильных деталей ГТД / О. И. Шинский, И. И. Максютя, А. В. Нейма // *Металл и литье Украины*. – 2013. – № 9. – С. 14–18.
13. *Тупчиенко В. И.* Разработка и внедрение новых направлений процесса литья по растворяемым пенополистироловым моделям: Дис. канд. техн. наук. – Краматорск, 1984. – 224 с.
14. *Мандрик Е. А.* Совершенствование метода точного литья по растворяемым пенополистироловым моделям / Е. А. Мандрик, В. И. Тупчиенко, Е. А. Апанасенко // *Прогрессивные методы получения отливок*. – Нижний Новгород. – 1983. – С. 33–35.
15. *Шинский О. И.* Применение растворяемых пенополистироловых моделей при получении литых деталей газотурбинных установок / О. И. Шинский, И. И. Максютя, Ю. Г. Квасницкая, А. В. Нейма // *Литье и металлургия* (г. Минск, Беларусь). – 2016. – № 1. – С. 46–52.
16. *Максюта И. И.* Взаимодействие компонентов в системе «оксид - модификаторы» в корундовой формовочной керамике для деталей с ориентированной структурой / И. И. Максютя, Ю. Г. Квасницкая, А. М. Верховлюк, Ю. Н. Левченко // *Металл и литье Украины*. – 2017. – № 8 – 10. – С. 31–37.



References

1. Verhovliuk, A.M., Maksuta, I.I., Kvasnytska, Yu.H., Mialnytsia, H.P. & Mihnian, O.V. (2016) Fazovo-strukturna stabil'nist' zharomitsnogo korozijnostiikogo splavu dlia lyttia robochih lopatok GTU [Phase-structural stability of high-temperature non-corrosive alloy for casting blades of gas turbines]. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, Vol. 3, pp. 3–9 [in Ukrainian].
2. Maksuta, I.I., Kvasnytska, Yu.H., Mihnian, O.V. (2017) Uovershenstvovanie sposobov poluchenija otlivok s oriietirovannoi strukturoi dlia robochih lopatok GTD [Improvement of methods for producing castings with an oriented structure for GTE blades]. *Processy lit'ja*, Vol. 4, pp. 66–74 [in Ukrainian].
3. Kvasnytska, Yu.H., Kliass, O.V., Kreshchenko, V.A., Mialnytsia, H.P., Maksuta, I.I. & Shinskii, O.Y. (2016, 12 January) Patent of Ukraine for invention №110–529.
4. Kablov, E.N. (2001). Litye lopatki gazoturbinnnykh dvigatelei (splavy, tehnologiiia, pokrytiia) [Cast blades of gas turbine engines (alloys, technology, coatings)]. Moscow: MISIS [in Russian].
5. Maksuta, I.I., Klias, O.V., Kvasnitskaia Yu.H., Mialnitsa H.F. & Mihnian E.V. (2014) Tehnologicheskie osobennosti vysokokhromistogo nikellevogo splava, kompleksnolegirovannogo reniem i tantalom [Technological features of high-chromium nickel alloy complex solutions with rhenium and tantalum]. *Sovremennaia elektrometallurgiiia*, Vol. 1, pp. 41–48 [in Russian].
6. Kvasnitskaia, Yu.H., Maksuta, I.I., Mialnitsa, H.F. (2016) Povyshenie stojkosti k vysokotemperaturnoi korrozii zharoprochnykh splavov kak rezerv vozrastaniia resursnykh vozmozhnostej gazoturbinnnykh dvigatelej [Increase of resistance to high-temperature corrosion of high-temperature alloys as a reserve of increasing resource capabilities of gas turbine engines]. *Metall i lit'e Ukrainy*, Vol. 5, pp. 3–7 [in Ukrainian].
7. Simanovskij, V.M. (2008) Teoriia ta tekhnologiia modifitsirovaniia formovochnykh smesey dlia otlivok s spetsial'nykh splavov. Avtoref. diss. doktor tehn. nauk. [Theory and technology of sand blends inoculation for a casts from special alloys. Abstract doct. techn. sci. diss.]. Kiev, 36 p.
8. Simanovskij, V.M., Maksuta, I.I., Kvasnytska, Yu.H., Shinskij, O.I., Mihnian, E.V. & Nejma A.V., (2011) Osnovnyie trebovaniia k formovochnym materialam dlia polucheniia detaley s oriietirovannoi strukturoi [Basic requirements for molding materials for obtaining details with an oriented structure.]. *Visnyk Donbas'koi akademii, zbirnyk naukovykh prats'* Vol. 4, pp. 139–141 [in Ukrainian].
9. Simanovskij, V.M., Kvasnytska, Yu.H., Yefimova, V.H., Yefimov, H.V., & Maksuta, I.I. (2006, 15 November) Patent of Ukraine for invention 18889.
10. Simanovskij, V.M., Kvasnytska, Yu.H., Shinskij, O.I., Maksuta, I.I., Sushkov, M.O., & Yefimova, V.H. Smes' dlia izgotovleniia liteynykh keramicheskikh sterzhnej [A mixture for producing casting ceramic rods]. (2008, 25 April) Patent of Ukraine for invention 82603.
11. Shinskij, O.I. (1997) Gazogidrodinamika i tehnologii lit'ja zhelezouglerodistykh i cvetnykh splavov po gazifitsiruemym modeljam. Diss. doktor tehn. nauk. [Gas-hydrodynamics and casting technologies of iron-carbon and non-ferrous alloys in gasified models. Doct. techn. sci. diss.]. Kiev, 481 p.
12. Shinskij, O.I., Maksuta, I.I., Nejma, A.V. (2013) Osobennosti primeneniia rastvorjaemykh penopolistirolovykh modelej dlia polucheniia slozhnoprofil'nykh detalej GTD [Features of the application of soluble cellular polystyrene models for getting complex GTE parts]. *Metall i lit'e Ukrainy*, Vol. 9, pp. 14–18 [in Ukrainian].
13. Tupchienko, V.I. Razrabotka (1084) I vnedrenie novykh napravlenij processa lit'ja po rastvorjaemykh penopolistirolovykh modeljam: Diss. kand. tehn. nauk. [Development and implementation of the new directions of the casting process for the dissolved cellular polystyrene models. Cand. techn. sci. diss.]. Kramatorsk, 224 p.
14. Mandrik, E.A., Tupchienko, V.I., Apanasenko, E.A. (1983) Sovershenstvovanie metoda tochnogo lit'ja p orastvorjaemykh penopolistirolovykh modeljam [Improvement in the method of precision casting of dissolved cellular polystyrene models]. *Sbornik trudov «Progressivnye metody polucheniia otlivok»*. Nizhnij Novgorod, pp. 33–35 [in Russian].
15. Shinskij, O.I., Maksuta, I.I., Kvasnitskaia, Yu.H., Nejma, A.V. & Mihnian, E.V. (2016) Primenenie

rastvorjaemyh penopolistirolovyh modelej pri poluchenii lityh detalej gazoturbinnih ustanovok [The use of soluble foam polystyrene models for the production of cast parts of gas turbine plants].

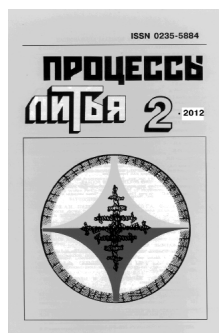
Lit'e i metallurgija, Vol. 1, pp. 46–52 [in Russian].

16. Maksiuta, I.I., Kvasnytska, Yu.H., Verhovliuk, A.M., Mihnian, O.V. & Levchenko, Ju.N. (2017) Vzaimodejstvie komponentov v sisteme «oksid - modifikatory» v korundovoj formovочноj keramike dlja detalej s orientirovannoj strukturoj [Interaction of components in the system "oxide-modifiers" in corundum molding ceramics for details with an oriented structure]. Metall i lit'e Ukrainy, Vol. 8–10, pp. 31–37. [in Ukrainian].

Поступила 24.04.2018

ПРОЦЕССЫ ЛИТЬЯ

**Ведущий украинский научно-технический
журнал по литейному производству
и металлургии**



Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины с 1992 г. издает (6 раз в год) научно-технический журнал “Процессы литья” на русском языке. Журнал пользуется широкой популярностью среди научных и инженерно-технических работников металлургической и машиностроительной промышленности, литейного производства, а также работников вузов и научно-исследовательских институтов. Он получил широкое распространение в Украине и за рубежом.

В журнале публикуются научно-технические статьи, рекламные материалы и коммерческие сообщения.

Признавая ведущую роль в науке фундаментальных исследований, в журнале представлены следующие научные направления:

- Гидродинамика процессов литья
- Теплофизика затвердевания сплавов
- Массоперенос, кристаллизация и структурообразование сплавов
- Внешние воздействия на жидкий и кристаллизующийся металл
- Металло- и материаловедение
- Новые прогрессивные технологии литья
- Получение и подготовка расплавов к разливке
- Проблемы технологии формы
- Специальные способы литья
- Коммерческие сообщения

В редакцию подается статья, распечатанная на любом принтере, а также на электронных носителях с материалом для опубликования. Срок выхода статьи с момента поступления в редакцию журнала - 3 месяца.

Для публикации в журнале рекламно-информационных материалов необходимо направить в редакцию журнала гарантийное письмо, в котором следует указать желаемый формат и место их размещения с приложением текста и иллюстративных материалов (фото, рисунки и др.).

Подписаться на журнал Вы можете через редакцию журнала (стоимость журнала - 65 грн.). Для этого необходимо направить письмо-запрос или факс в адрес редакции для оформления счета-фактуры. Вы также можете приобрести электронную версию журнала.

АДРЕС РЕДАКЦИИ: Украина, 03142, Киев-142, буль. Вернадского 34/1,
тел.: (044) 424-04-10; факс: (044) 424-35-15; E-mail: metal@ptima.kiev.ua;
proclit@ptima.kiev.ua