



УДК 669.245.018:629

Поступила 29.12.2015

ПРИМЕНЕНИЕ РАСТВОРЯЕМЫХ ПЕНОПОЛИСТИРОЛОВЫХ МОДЕЛЕЙ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК APPLICATION OF POLYSTYRENE FOAM CORE FUSIBLE PATTERNS IN PRODUCTION OF GAS TURBINES' CAST PARTS

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. MAKSIUTA, Yu. G. KVASNITSKAYA, E. V. MIKHNYAN, A. V. NEIMA,
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.

Авторами предложен и опробован технологический процесс получения сложнопрофильных отливок из жаропрочного сплава марки СМ 88У-ВІ способом литья по растворимым пенополистироловым моделям в оболочковые керамические формы. В результате исследований для группы растворителей определены кинетические параметры процесса растворения и удаления продуктов деструкции для форм разных объемов. Отсутствие поверхностных дефектов отливок, снижение шероховатости, повышение их класса точности в сравнении с принятыми технологическими регламентами процессами производства позволило снизить затраты на механическую обработку деталей и увеличило коэффициент использования дорогостоящих жаропрочных сплавов.

The task of replacing the LVM dissolves polystyrene molding on models is at the present time, technologically, economically and environmentally promising from the point of view of industrial applications for gas turbine plants in Ukraine. The authors proposed and tested manufacturing process of casting ceramic molds way to remove the polystyrene model of the dissolution of her organic solvents. Kinetic parameters of the process of dissolving and removing patterns of degradation products the polystyrene in the group of solvents depending on the type and amount of polystyrene were identified. The absence of surface defects of castings, reduction of roughness, increased their accuracy class in comparison to accepted technological regulations of the process of production, which reduced the cost of machined parts and increased utilization of expensive heat-resistant alloys were produced.

Ключевые слова. Жаропрочный сплав, керамические формы, растворимая модель, пенополистирол, продукты деструкции, кинетические параметры.

Keywords. Heat-resistant alloy, ceramic mold, dissolve model, polystyrene, destruction products, kinetic parameters.

Введение, цели исследования

Важнейшие характеристики газотурбинных двигателей, в первую очередь КПД и ресурсные показатели, зависят от работоспособности рабочих лопаток компрессоров. Основным конструкционным материалом для такого рода деталей в современных агрегатах остаются многокомпонентные никелевые сплавы, для максимально возможной реализации жаропрочных свойств которых применяют как эффективное комплексное легирование, так и улучшение эксплуатационных характеристик литых деталей из них. Таким образом, задача повышения эффективности современных газотурбинных установок (ГТУ) требует решения как материаловедческих, так и технологических задач, связанных с процессами литья, в том числе формообразования при получении отливок [1, 2].

Известно, что технологическим приемом, позволяющим получать такие сложнопрофильные детали, как сопловые и рабочие лопатки ГТУ, является использование одноразовых оболочковых форм с выплавляемыми моделями (способ ЛВМ). Однако этот способ становится все менее эффективным по мере возрастания габаритов модели (от 400 мм и выше), например, для деталей современных энергетических наземных агрегатов, что связано с низкой (около 30 °С) температурой размягчения воскодержавшей модельной массой, ее значительной объемной и линейной усадкой.

Как показывает анализ научно-патентной литературы, технологической, экономической и экологической альтернативой воскодержущим моделям могли бы стать одноразовые модели из полимерных материалов. Повышения размерной точности деталей и чистоты поверхности, снижения шероховатости можно достичь при применении литья в комплексно-модифицированные оболочковые формы с использованием растворимых моделей из вспененного полистирола (ППС).

Учитывая актуальность решения для развития отечественного газотурбостроения проблем, представленных выше, целью проводимых авторами статьи исследований является оптимизация процесса литья и изготовления форм по растворимым моделям из ППС при получении рабочих лопаток первых ступеней силовой турбины серийного агрегата ДГ80 из структурностабильного сплава типа СМ 88У-ВИ с повышенным содержанием активных тугоплавких элементов. 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.

Состояние вопроса

Для достижения поставленной цели авторами проведен комплекс экспериментов для определения оптимальных температурно-временных параметров процесса растворения ППС-моделей (объемная скорость $V_{об}$, расходный коэффициент $K_{расх.}$) в зависимости от типа ППС и с учетом объема модели, а также наиболее полного удаления продуктов деструкции из оболочковых форм, одновременно решая задачу сохранения основных этапов технологического процесса изготовления форм, принятых для предприятий отрасли.

Следует отметить, что на предыдущих этапах работы для лопаток ГТД с равноосной структурой из сплавов серийных марок ЧС70ВИ, ЧС88ВИ авторами получены положительные результаты при опробовании процесса изготовления форм на основе корунда с растворимыми ППС-моделями, в том числе определены параметры кинетики растворения моделей толуолом, ацетоном, растворителями № 646, № 647 [3]. По комплексу показателей (скорость растворения, расходный коэффициент, возможность повторного применения, экономичность) наиболее приемлемым оказался растворитель № 646, однако по уровню предела допустимых концентраций (ПДК) (табл. 1) он достаточно токсичен. В работах [4, 5] было опробовано применение таких растворителей, как декалин и тетралин, которые, являясь эффективными растворителями ППС, по уровню ПДК и летучести (табл. 1) значительно более токсичны.

Таблица 1. Сравнительная характеристика ряда растворителей

Наименование и химическая формула	Молекулярная масса	Плотность, г/см ³	Температура вспышки, °С	Температура кипения, °С	ПДК, мг/м ³	Летучесть по этиловому эфиру, %
Ацетон CH_3COOH_3	58,08	0,79	-18	56,1	200	2,1
Декалин $C_{10}H_{18}$	138,25	0,87	-40	185,5	100	175
Этанол C_2H_5OH	46	0,79	13	78,4	1000	8,3
Скипидар живичный $C_{10}H_{16}$	136	0,85-0,86	34	160	300	-
Тетралин $C_{10}H_{12}$	132,21	0,97	71,1	207,6	100	190
Уайт-спирит	-	0,77	33-36	147-200	300	40-60
Растворитель № 646 (основа толуол)	-	0,87	6	59	150	8-15

Исходя из указанных выше эмпирических данных и с учетом характеристик, приведенных в табл. 1, для проведения экспериментов были выбраны такие растворители, как живичный скипидар (ГОСТ 1571-82), технический скипидар (ТУ 13-0279856-74-87) и растворитель № 646 (ТУ У 24.3-00904996-004-2004).

Выбор объектов исследования и постановка экспериментов

Для проведения исследований на данном этапе при получении отливок были выбраны разрабатываемые в ФТИМС НАН Украины совместно с ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект» (г. Николаев) высокохромистые литейные сплавы на основе никеля марки СМ88У-ВИ (ХН57КВЮТМБРЛ-ВИ). Поскольку перепады температур по высоте лопатки в процессе эксплуатации достигают 250-270 °С (рис. 1), то для повышения структурно-фазовой стабильности отливки проведена оптимизация состава элементов дополнительного легирующего комплекса сплава.

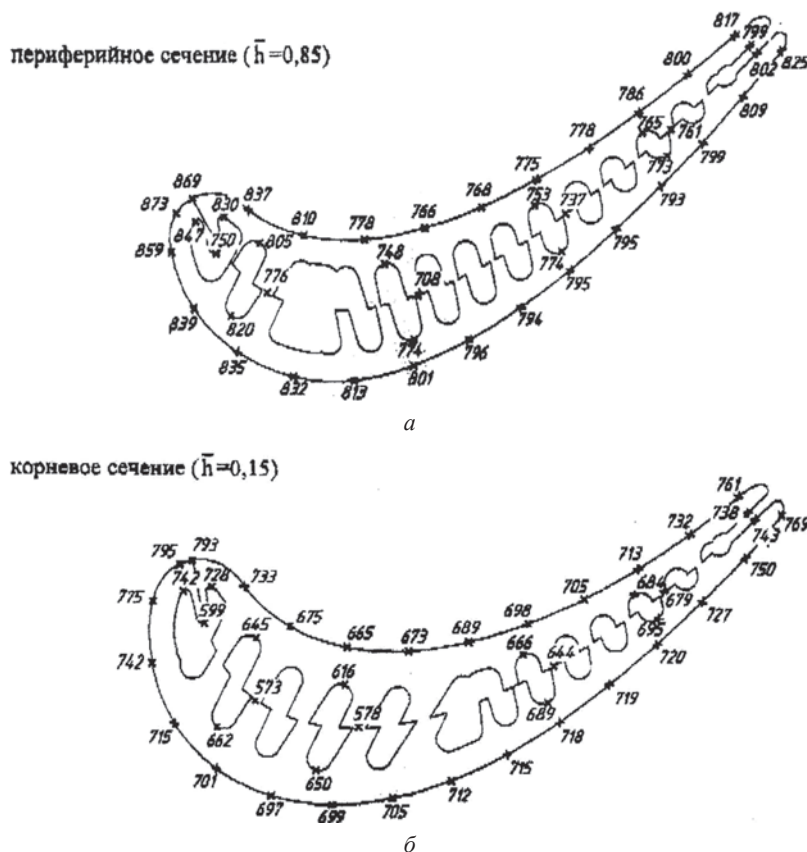


Рис. 1. Результаты расчета температурного состояния рабочей лопатки первой ступени компрессора высокого давления в двух сечениях по высоте: а – периферийное сечение лопатки ($h = 0,85$); б – корневое сечение лопатки ($h = 0,15$)

Как показали исследования, проведенные методом высокотемпературного дифференциального термического анализа (ВДТА) на установке ВДТА-8М с точностью $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, сплав имеет более высокую температуру начала растворения упрочняющей γ' -фазы.

В качестве формовочной композиции оболочковых форм была взята огнеупорная смесь на основе микропорошка М10 электрокорунда белого марки 24А (ГОСТ 28818-90), модифицированная [6] порошками алюминия АСД-4 (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). 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.

Для изготовления моделей были использованы марки пенополистирола различной плотности и прочности. Следует отметить, что в работе [3] 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, для разного типоразмера лопаток целесообразно использовать ППС повышенной плотности и прочности, так называемый экструдированный ППС марки Styrodur С (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.

Для проведения исследований использовали образцы нескольких типоразмеров из двух типов ППС. Модели изготавливали из пенополистирола марки ПСБ-25 (EPS-EN13163) по ДСТУ Б EN 13163-2013 плотностью 25 кг/м^3 и из значительно более прочного (табл. 2) ППС (Styrodur С) марки 4000 CS (XPS СТО 72746455-3.3.1-2012) плотностью 35 кг/м^3 , имеющего однородную структуру из закрытых герметических ячеек, содержащих воздух. Этот тип ППС благодаря плотной структуре обеспечивает большую жесткость и пониженную шероховатость элементов модели, при этом является экологически чистым, так как при его производстве не используются фреоны.

Перед испытанием образцы измеряли не менее чем в трех точках с погрешностью не более $0,1\text{ мм}$. Для взвешивания образцов с целью определения истинной плотности ρ (кг/м^3) использовали весы лабо-

раторные электронные 4-го класса модели ВЛ Э134 завода «Госметр» (г. Санкт-Петербург). Оптимальный расходный коэффициент растворителя выбирали исходя из результатов предыдущих опытов [3]: 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 $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Таблица 2. Характеристики разных марок ППС

Показатель	Тип пенополистирола					
	пенополистирол блочный, марки			Styrodur C, экструдированный, марки		
	ПСБ-15	ПСБ-25	ПСБ-35	2500 C	2800 C	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%-ной линейной деформации, МПа	0,05	0,10	0,16	0,20	0,30	0,50

Согласно разработанной авторами методике, в экспериментальную установку-контейнер [7] с прозрачной стенкой помещали образцы ППС различной плотности и объема таким образом, чтобы их плоскости плотно прилегали к стенкам емкости, что имитировало «замкнутость» модели в форме. Растворитель заливали на верхнюю поверхность образцов с учетом выбора расходного коэффициента, определяющего соотношение «объем полости модели/объем растворителя». На прозрачную стенку установки наносили координатную сетку с ячейкой 20×20 мм, с помощью которой определяли продвижение фронта растворения с фиксацией на видеокамеру. Исследовано пять серий по три образца, за результат испытания принимали среднеарифметическое значение объемной скорости растворения $V_{об}$ (см³/мин).

Обсуждение результатов

Анализ результатов опытов и их математической обработки, представленных на гистограммах (рис. 2, 3) (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 производства, учитывая высокую скорость растворения, более экономичным будет применение растворителя № 646.

Тепловое движение полимерных цепей и звеньев в связи с увеличением температуры усиливает диффузионные явления в системе полимер-растворитель, а, значит, и повышает растворимость ППС. Через определенные равные промежутки времени (0,5–3 мин) отмечали фронт проникновения растворителя и фронт полного растворения образцов по координатной сетке, предварительно нанесенной на прозрачные стенки емкости с образцом модели.

Важным показателем для эффективности протекания процесса растворения является выбор расходного коэффициента, определяющего соотношение «объем модели/объем растворителя». Для проведения экспериментов были выбраны значения коэффициентов 5, 3, 2, 1. Среди опробованных растворителей

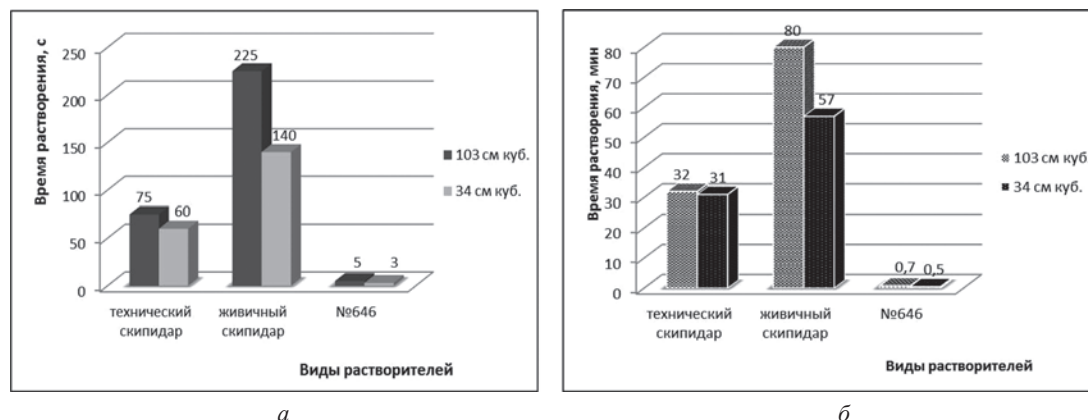


Рис. 2. Зависимость времени растворения ППС различных типов от видов растворителя: а – блочный ППС, $\rho = 25\text{ кг/м}^3$; б – экструдированный ППС, $\rho = 35\text{ кг/м}^3$

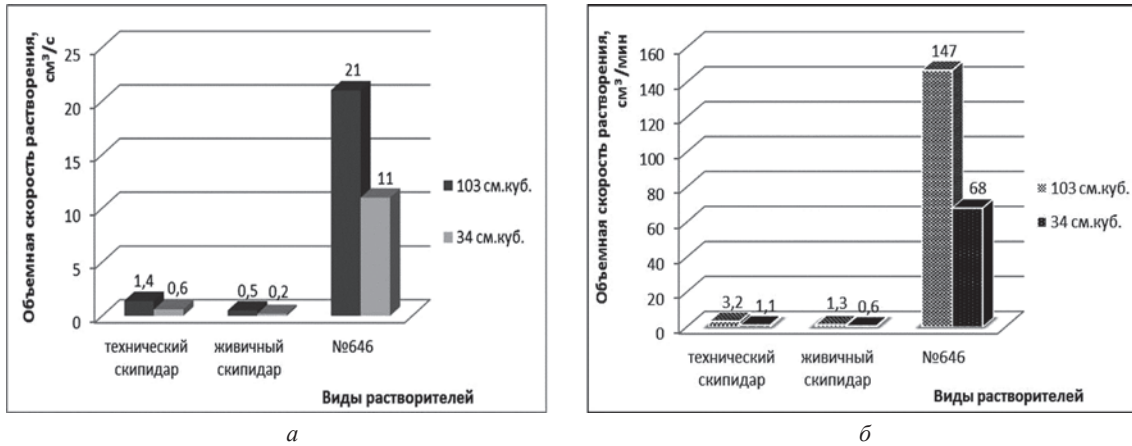


Рис. 3. Зависимость объемной скорости растворения ППС от видов растворителя: а – блочный ППС, $\rho = 25 \text{ кг/м}^3$; б – экструдированный ППС, $\rho = 35 \text{ кг/м}^3$

наиболее приемлемым по комплексу показателей (экономичность, время растворения, коэффициент использования, экологичность) оказался растворитель № 646.

После проведения натурных экспериментов на формах определили, что за счет избытка растворителя при расходном коэффициенте 5 и 3 может наблюдаться осыпание внутреннего облицовочного слоя, что естественно снижает прочность формы. Оптимальным соотношением для форм объемом 1000–1500 см³ оказались расходные коэффициенты 1–2, для форм объемом 3000 см³ – коэффициенты 2–3, выбор значений которых зависит от конфигурации отливки, определяющей площадь реакционной поверхности.

Эксперименты показали, что особенности растворения блочного ППС состоят в том, что в начальной стадии растворения жидкость проникает в открытые поры и наблюдается некоторая степень разряжения в гранулах ППС, вызванная уменьшением его объема и постепенно увеличивающаяся до полного распада на отдельные ячейки: происходит в некоторой степени принудительное проникновение (всасывание) растворителя в объем гранул до полного их растворения, т. е. диффундированный таким образом растворитель интенсивно разрушает стирольные стенки ячеек и на последнем этапе растворения происходит «супербыстрый» распад пенополистирола.

Наблюдение в ходе экспериментов за особенностями растворения экструдированного ППС, отличающегося более плотной микроструктурой и отсутствием отдельных ячеек (гранул), а следовательно, и макропор между ними, которые могут служить траекториями быстрого проникновения растворителя, показало снижение скорости растворения (деструкции) в среднем в 20–30 раз (рис. 3) по сравнению с блочным ячеистым ППС.

На втором этапе работы в керамические формы на основе корунда, полученные после растворения моделей, произвели заливку расплава в вакуумно-индукционной печи УППФ-2 (Россия, г. Ржев). Проанализировали качество полученных отливок с точки зрения газонасыщения (рис. 4) и дефектов поверхностного слоя в зоне контакта металл-форма, что дало возможность оценить полноту удаления продуктов деструкции модели предложенным способом. Приведенные на гистограмме (рис. 4) данные свидетельствуют о том, что полученные разрабатываемым методом удаляемых ППС-моделей отливки имеют минимальный уровень загрязнений приповерхностной зоны, сравнимый со значениями, не превышающими уровень, допустимый регламентными отраслевыми документами для отливок аналогичного назначения.

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 $T_{\text{прокалки}} = 450\text{--}650 \text{ }^\circ\text{C}$ 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), причиной чего являлось интенсивное газовыделение в момент заливки металла. Этот недостаток был устранен за счет изменения конструкции форм,

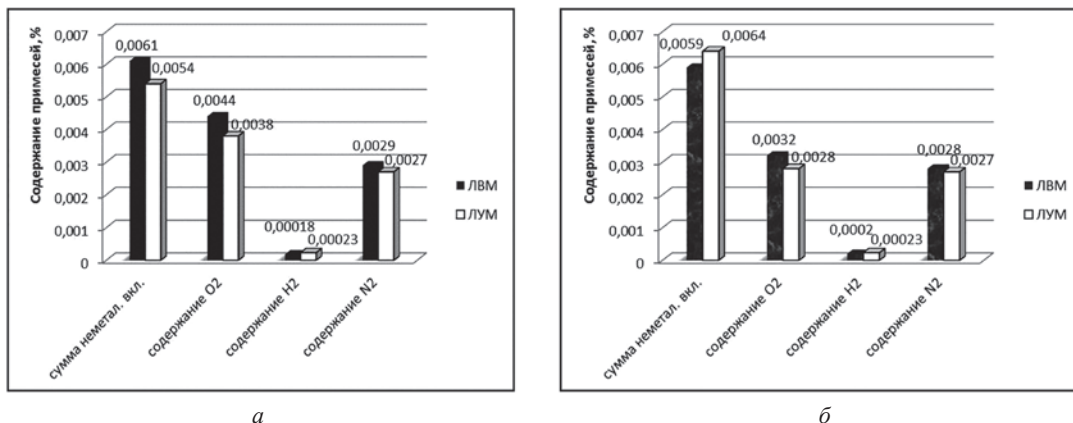


Рис. 4. Сравнительная характеристика чистоты приповерхностной зоны (по содержанию газов) в отливках, полученных методом ЛВМ и ЛУМ: *а* – для жаропрочного сплава; *б* – для стали 12Х18Н10Т

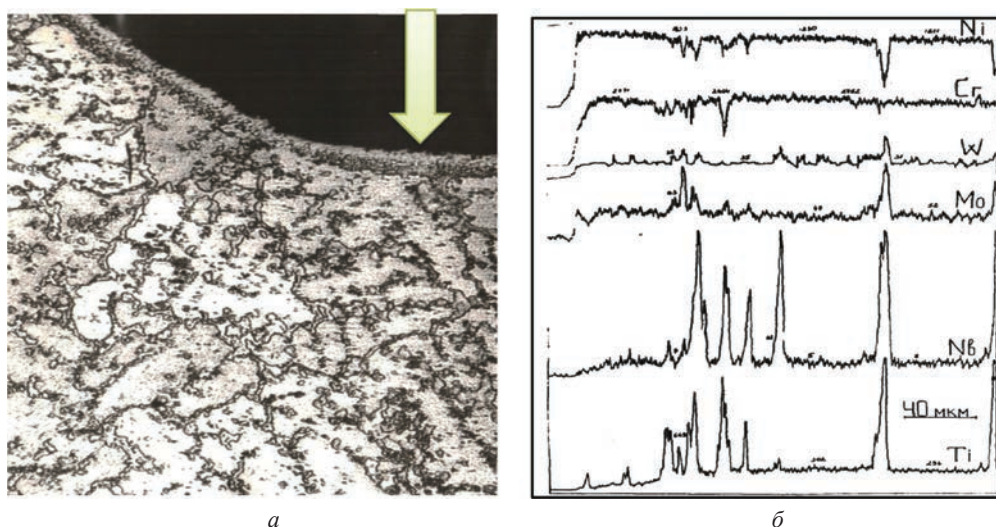


Рис. 5. Распределение легирующих элементов вдоль зоны сканирования отливки (МРСА, микроанализатор JXA8600 фирмы JEOL): *а* – фрагмент микроструктуры литой детали из жаропрочного сплава CM 88У-ВИ; *б* – кривые распределения легирующих элементов (Ni, Cr, W, Mo, Nb, Ti). *а* – $\times 500$

а именно: на дне формы были установлены промывники, давшие возможность полностью удалить гелеобразную фракцию даже при однократной процедуре промывки растворителем № 646. Затем проводили двухэтапное просушивание форм: 48 ч на воздухе при $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ с последующей сушкой 3 ч при $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ в термической печи типа СВЕН. Высокотемпературную термообработку проводили при $T = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$, 6 ч на воздухе в той же термической печи без промежуточного охлаждения. Визуальный осмотр оболочек (10 шт.) и последующее использование форм для заливки жаропрочным сплавом показали высокую трещиностойчивость и прочность форм.

Проведенные 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, практически не наблюдается дефектов приповерхностного слоя в виде зоны газовой пористости (рис. 5).

Отсутствие поверхностных дефектов отливки позволило снизить затраты на механическую обработку деталей. Из залитых 10 форм разного объема растрескивание обнаружили у одной в области перехода стоек-чаша. В последующем выявленный недостаток предполагается устранить за счет увеличения количества облицовочных слоев или введением модификаторов в формовочную смесь [6].

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.

Точность отливок, полученных по оптимизированному процессу, повышена в среднем на один класс (по некоторым измеряемым параметрам даже выше). Обосновать это можно тем, что, во-первых, усадка

моделей из пенополистирола составляет всего 0,03–0,04%, значит, размеры моделей максимально приближены к рабочим размерам пресс-форм, что существенно влияет на точность отливок. Во-вторых, огнеупорные оболочки, получаемые из комплексно-модифицированной керамики, значительно прочнее оболочек, изготовленных по стандартному регламенту для ЛВМ, а значит, и более стабильны по геометрическим размерам. Эти факторы, очевидно, и явились причиной существенного повышения точности литья в новом процессе. С литой поверхности в 5–6 разных участках на профилографе-профилометре снимали профилограммы в различных направлениях, на основании которых анализировали изменение шероховатости, а также с прибора показания значений геометрических характеристик, т. е. среднее арифметическое отклонение профиля соответственно 5,96–16,32 мкм (формы по растворяемым моделям) и 7,09–18,6 мкм (формы по ЛВМ).

Полученные результаты позволяют сделать благоприятные выводы о возможности достаточно полного удаления продуктов деструкции ППС-модели, предложенным способом литья по удаляемым моделям (ЛУМ) методом растворения и получить отливку с более низкими показателями шероховатости, повышением класса чистоты в сравнении с данными по аналогичным отливкам, полученным принятым на предприятиях отрасли методом ЛВМ.

Литература

1. Каблов Е. Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технологии, покрытия. 2-е изд. М.: Наука, 2006. 632 с.
2. Репях С. И. Технологические основы литья по выплавляемым моделям. Днепропетровск: Лира ЛТД, 2006. 1056 с.
3. Шинский О. И., Максютя И. И., Нейма А. В. Особенности применения растворяемых пенополистироловых моделей для получения сложнопрофильных деталей ГТД // *Металл и литье Украины*. 2013. № 9. С. 14–18.
4. Тупчиенко В. И. Разработка и внедрение новых направлений процесса литья по растворяемым пенополистироловым моделям: Дис. ... канд. техн. наук. Краматорск, 1984. 224 с.
5. Мандрик Е. А., Тупчиенко В. И., Апанасенко Е. А. Совершенствование метода точного литья по растворяемым пенополистироловым моделям // *Прогрессивные методы получения отливок*. Нижний Новгород, 1983. С. 33–35.
6. Пат. № 82603, Украина, МПК (2006) B22C 9/10 C04B 35/04 (2008.01), C04B 35/10. Смесь для изготовления литейных стержней / В. М. Симановский, Ю. Г. Квасницкая, О. И. Шинский, И. И. Максютя, М. О. Сушков, В. Г. Сфимова. Оpubл. 25.04.2008 г., Бюл. № 8.
7. Шинский О. И., Максютя И. И., Квасницкая Ю. Г., Нейма А. В., Михнян Е. В. Кинетика растворения пенополистироловых моделей при способе литья в оболочковые формы // *Процессы литья*. 2014. № 4. С. 40–48.

References

1. Kablov E. N. *Litye lopatki gazoturbinnih dvigatelej: splavy, tehnologii, pokrytija* [Cast vanes of gas turbine engines: Alloys, Technologies, Coatings]. 2nd ed. Moscow, Nauka Publ., 2006. 632 p.
2. Repjah S. I. *Tehnologicheskie osnovy lit'ja po vyplavljaemym modeljam* [Technological basics of investment casting]. Dnepropetrovsk, Lira LTD Publ., 2006. 1056 p.
3. Shinskij O. I., Maksjuta I. I., Nejma A. V. Osobennosti primeneniya rastvorjaemyh penopolistirolovyh modelej dlja poluchenija slozhnoprofil'nyh detalej GTD [Features of the application of soluble cellular polystyrene models for getting complex GTE parts]. *Metall i lit'e Ukrainy – Metal and casting of Ukraine*, 2013, no. 9, pp. 14–18.
4. Tupchijenko V. I. *Razrabotka i vnedrenie novyh napravlenij processa lit'ja po rastvorjaemym penopolistirolovyh 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, 1984. 224 p.
5. Mandrik E. A., Tupchijenko V. I., Apanasenko E. A. Sovershenstvovanie metoda tochnogo lit'ja po rastvorjaemym penopolistirolovyh modeljam [Improvement in the method of precision casting of dissolved cellular polystyrene models]. *Sbornik trudov «Progressivnye metody poluchenija otlivok»* [Proc. «Progressive methods of producing castings»]. Nizhnij Novogorod, 1983, pp. 33–35.
6. Simanovskij V. M. e. a. *Smes' dlja izgotovlenija litejnyh keramicheskikh sterzhnej* [A mixture for producing casting ceramic rods]. Patent UA, no. 82603, 2008.
7. Shinskij O. I., Maksjuta I. I., Kvasnickaja Ju. G., Nejma A. V., Mihnjana E. V. Kinetika rastvorenija penopolistirolovyh modelej pri sposobe lit'ja v obolochkovye formy [Dissolution kinetics of polystyrene models for the method of casting in shell molds]. *Processy lit'ja = Casting process*, 2014, no. 4, pp. 40–48.