

Ю. Г. Квасницкая

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ОСОБЕННОСТИ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Предложено новое технологическое решение по применению пенокерамических фильтров в качестве питателей в процессе выплавки деталей газотурбинных двигателей. При использовании такого метода, происходит рафинирование расплава от вредных примесей (плен, неметаллических включений), что приводит к повышению качества получаемого изделия и снижению расхода жаропрочного сплава за счет отсутствия стандартных питателей.

Запропоновано нове технологічне рішення з використанням пінокерамічних фільтрів як живників в процесі виплавки деталей газотурбінних двигунів. При використанні такого методу може здійснитися рафінування розплаву від шкідливих домішок (неметалевих включень), це призводить до підвищення якості отриманих деталей та до зниження кількості витрат жароміцного сплаву за рахунок відсутності стандартних живників.

The new technological decision for using ceramic filters as a mould's choke in process of gas-turbine parts production was offered. This method provides melt refining from harmful nonmetallic impurities, increase superalloys quality and reduce superalloys consumption.

Ключевые слова: жаропрочные никелевые сплавы, пенокерамический фильтр, питатели, лопатки ГТД.

В современном газотурбостроении детали, имеющие сложную форму, получают методами точного литья, в том числе по выплавляемым моделям. Качество лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) из коррозионностойких жаропрочных сплавов на основе никеля обеспечивается в значительной степени чистотой исходного материала, что в свою очередь, обуславливает выход годного.

Жаропрочные сплавы для выплавки деталей в основном производятся за пределами Украины и закупаются нашими предприятиями (ГП НПКГ «Зоря-Машпроект», ОАО «Мотор-Сич», ЗМКБ «Прогресс»). Стоимость этих материалов высокая, в связи этим проблема повышения коэффициента использования металла и качества получаемых изделий является весьма актуальной.

Ранее в Физико-технологическом институте металлов и сплавов НАН Украины проводились работы по утилизации литейных отходов жаропрочных сплавов с помощью совмещенных электронно-лучевого и вакуумно-индукционного переплавов, для чего использовалась установка УППФЗ-М. В результате структура и свойства получаемых лопаток соответствовали уровню характеристик изделий, получаемых по стандартным заводским технологиям. Кроме того, применение агрегата ПМП-4М и многоуровневой литейной формы оригинальной конструкции для направленной кристаллизации [1-3] позволяет значительно повысить коэффициент использования металла за счет вовлечения в технологический процесс отходов литейного производства жаропрочных сплавов.

Однако включение в технологический процесс совмещенной электронно-лучевой и вакуумно-индукционной плавки или агрегата ПМП-4 зачастую экономически нецелесообразно вследствие высокой стоимости оборудования и значительных энергетических затрат. Решение этой задачи представляется возможным благодаря внесению незначительных, но эффективных изменений в технологию изготовления деталей ГТД.

Повышение уровня физико-механических свойств сплавов может быть осуществлено за счет снижения загрязненности их неметаллическими включениями. Одним из перспективных способов решения этой задачи может быть способ фильтрующего рафинирования. Суть способа заключается в пропускании металлического расплава через фильтр, в котором происходит отделение неметаллических частиц и закрепление их на поверхности фильтра.

В последние годы в литейном производстве находят широкое применение пеноке-

рамические фильтры (ПКФ) (рис. 1) с пористостью до 90 % и размером пор 0,5-5,0 мм [4]. Эффективность очистки расплавов от неметаллических включений в ПКФ обусловлена, прежде всего, силами адгезии (хорошая смачиваемость, большая удельная поверхность), а также внутренней лабиринтной структурой фильтра, обеспечивающей высокий коэффициент массообмена между расплавом и поверхностью фильтра.

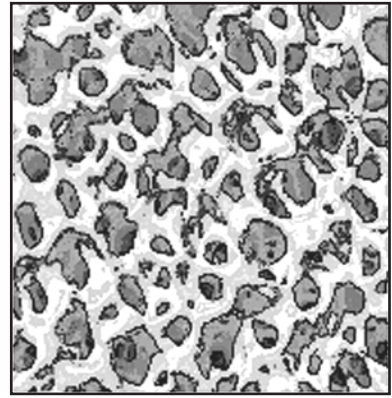


Рис. 1. Пенокерамический фильтр

Анализ большого числа научных публикаций, посвященных теории фильтрации расплавов [4, 5], позволяет считать, что наиболее полной является математическая модель процесса фильтрации, описываемая следующим уравнением [5]:

$$\eta = \left[1 - \exp\left(-\frac{kS_{\phi}H_0}{V}\right) \right] \left(1 - \frac{C_{рав}}{C_{исх}} \right),$$

где $\eta = \frac{C_{исх} - C}{C_{исх}}$ - степень фильтрации; $C_{исх}$; C – концентрация неметаллических включений до и после фильтрации, кг/м³; $C_{рав}$ – равновесная концентрация примесей в расплаве, кг/м³; k – коэффициент скорости процесса удаления примесей, м/с; S_{ϕ} – удельная поверхность ПКФ, м⁻¹; H_0 – толщина ПКФ, м; V – скорость фильтрации жидкого металла (м/с) определяется уравнением

$$V = \frac{m}{\rho\tau S_0},$$

где m – масса заливаемого сплава, кг; ρ – плотность заливаемого сплава, кг/м³; τ – время заливки, с; S_0 – площадь фильтра, м².

Из формулы следует, что, регулируя толщину и площадь фильтра при постоянной удельной поверхности пенокерамического фильтра и массе сплава, можно добиться максимальной эффективности фильтрации.

С учетом высокой пористости и низкой плотности ПКФ решающую роль играют прочностные характеристики керамики. Реальная нагрузка, действующая на фильтр в начальный момент заливки, – это динамический удар струи металла.

Технология получения ПКФ основана на дублировании структуры ячеистого пеноматериала, в основном, пенополиуритана, включает следующие основные операции: подготовка модельного состава необходимых размеров, приготовление керамической суспензии, пропитка модели суспензией, удаление излишков суспензии, сушка и спекание фильтра.

Анализируя работы других авторов по применению материалов ПКФ и проверенной термодинамической оценки вероятности осаждения в качестве существующих в металле включений на поверхности фильтра [6], а также учитывая экономическую целесообразность, термостойкость и механическую прочность фильтра, в данной работе предлагаются материалы на основе корунда или циркона с применением модификаторов, а в качестве связующего – гидролизованного этилсиликата.

Составы и характеристики материалов для фильтров приведены в табл. 1.

Таблица 1. Составы и свойства пенокерамических фильтров

ГрЭТС, %	Корунд, %мас.	Циркон, %мас.	Al АСД-4, %мас.	$\sigma_{изг}$, МПа	Пористость, %	Плотность, г/см ³
27±0,5	68±0,5	-	5±0,1	4,5±0,1	85±2	0,5
26±0,5	-	69±0,5	5±0,1	4,6±0,1	85±2	0,55

Гидролиз этилсиликата проводили при использовании в качестве катализатора *n*-толуолсульфокислоту.

Влияние фильтрации на уровень таких важных механических характеристик, как прочность и пластичность жаропрочных сплавов было показано в работе [7]. Результаты этих исследований представлены гистограммами на рис. 2: 1 – нефильтрованный сплав; 2 – сплав, профильтрованный через зернистый фильтр (шариковидный корунд от 3-12 мм); 3 – сплав, профильтрованный через пенокерамический фильтр (относительная пористость составляет 0,8-0,95).

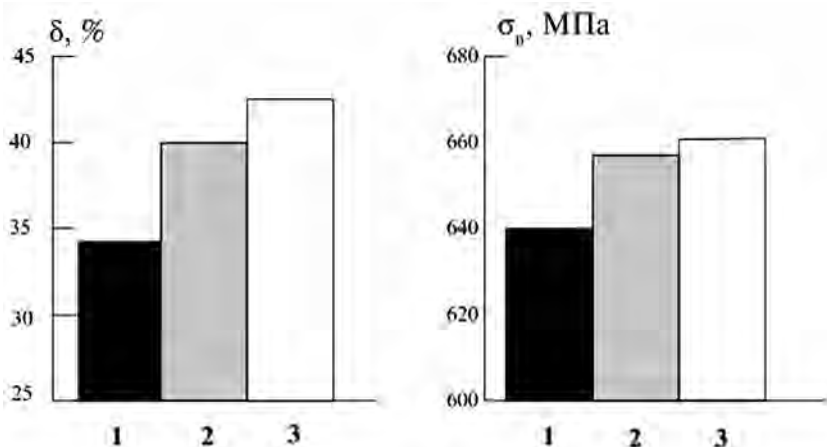


Рис. 2. Зависимость механических характеристик жаропрочного сплава от способа фильтрации: 1 - нефильтрованный расплав; 2 - зернистый фильтр; 3 – пенокерамический фильтр

Видно, что применение пенокерамических фильтров при выплавке жаропрочных сплавов ведет к повышению механических свойств.

В данной работе предлагается расширить функции пенокерамического фильтра. С целью упрощения конструкции литниково-питательной системы используются питатели-фильтры так называемого «дождевого типа». Изготовление такого питателя возможно путем установки на выходе литниковой чаши перед прибылью стандартного пенокерамического фильтра. Применение этого питателя позволяет снизить повреждаемость керамического стержня охлаждаемых лопаток благодаря снижению термического удара за счет разделения струи металла на множество струек, способствует повышению ламинарности течения расплава и обеспечению равномерности распределения расплава по внутренней полости лопатки, что в конечном итоге приводит к повышению качества изделия.

При этом пенокерамический фильтр длительное время сохраняет высокую температуру (1050+1580 °С) в условиях заливки.

Для литья рабочих охлаждаемых лопаток ГТД в данной работе были проведены экспериментальные плавки без фильтрации расплава и с применением фильтрации при помощи питателей «дождевого типа».

На рис. 3 показаны восковые модели рабочих лопаток (а) и экспериментальные блоки рабочих охлаждаемых лопаток (б), отлитых с помощью питателей «дождевого типа».

Сравнительный анализ макроструктуры образцов плавки с применением пенокерамических фильтров и без них показал, что использование питателя-фильтра позволяет получить более мелкозернистую структуру, снизить количество неметаллических включений, их размер и среднее расстояние между ними (табл. 2, рис. 4).

Для оценки эффективности описанных выше способов повышения чистоты жаропрочного сплава ЧС88У были проведены исследования микроструктуры лопаток ГТД, полученных вакуумно-индукционной плавкой (без применения фильтра) в печи УППФ-2, совмещенной вакуумно-индукционной и электронно-лучевой плавками в печи УППФ 3-М, вакуумно-термической плавкой с использованием направленного затвердевания в печи ПМП-4М и вакуумно-индукционной плавкой в печи УППФ-2 с

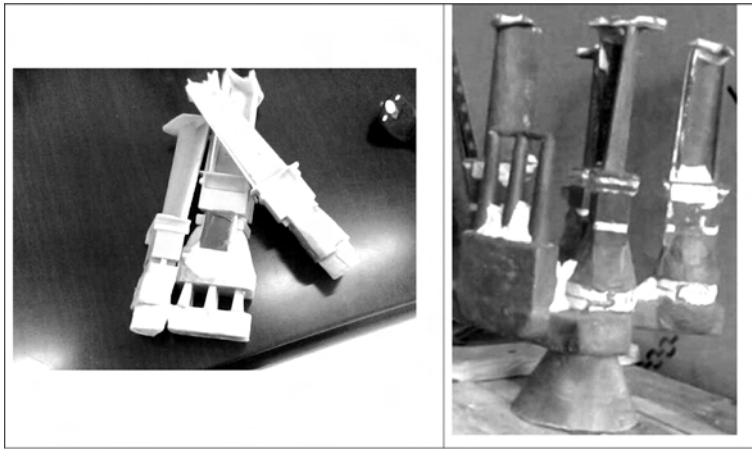


Рис. 3. Восковые модели (а) и экспериментальные блоки охлаждаемых лопаток ГТД (б), отлитые по предлагаемой технологии

Таблица 2. Влияние рафинирования расплава на степень загрязненности металла (готовое изделие)

Характеристики макро- и микроструктуры сплава	Вакуумно-индукционная плавка (без применения фильтра)	Применение питателей дождевого типа (пеночерамический фильтр)
Размер зерна, мкм	163×64	130×55
Количество включений на 1 мм ² (край/середина)	50/35	38/29
Размер включений, мкм	2,7-4,0	0,9-1,8
Среднее расстояние между включениями, мкм	12-14	23-26

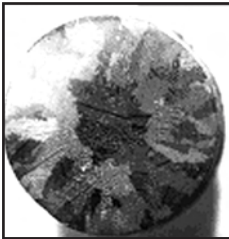

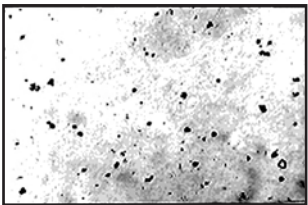

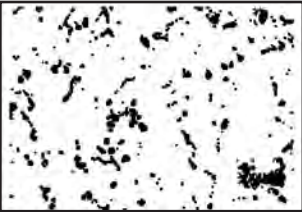
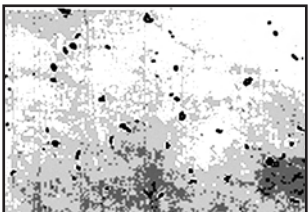
Макроструктура жаропрочных сплавов с применением пеночерамического фильтра	Вакуумно-индукционная плавка (без применения фильтра)	Применение питателей дождевого типа (пеночерамический фильтр)
	 ЧС70	 ×100
	 ЧС88У	 ×100

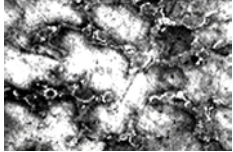
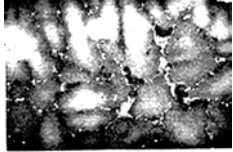
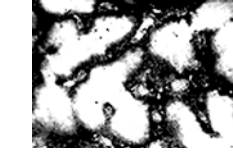
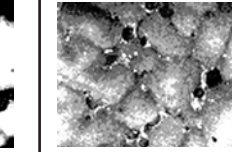
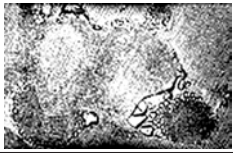

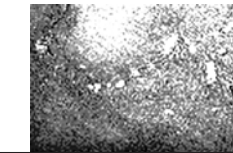
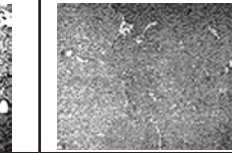
Рис. 4. Макро- и микроструктура экспериментальных образцов жаропрочных сплавов марки ЧС70, ЧС88У

Новые методы и прогрессивные технологии литья

применением питателей «дождевого типа». Во всех случаях отходы в шихте составляли 50 %. Были исследованы микроструктуры шлифов в литом и термообработанном состоянии на оптическом микроскопе «Neofot-2». Анализ микроструктур образцов показал, что вакуумно-индукционная плавка с применением питателей дождевого типа позволяет получить микроструктуру, аналогичную как при совмещенных вакуумно-индукционной и электронно-лучевой плавках.

Также оценивался выход годного для перечисленных выше способов получения лопаток ГТД, показатели которого для наглядности представлены также в табл. 3. При применении пенокерамических фильтров в качестве питателей «дождевого типа» снижается расход дорогостоящего жаропрочного сплава за счет уменьшения прибылей и отсутствия стандартных питателей.

Таблица 3. Микроструктура жаропрочного коррозионностойкого сплава ЧС88У после различных способов рафинирования расплава (50 % отходов)

Вакуумно-индукционная плавка (УППФ-2) (без применения фильтра)	Совмещенная вакуумно-индукционная и электронно-лучевая плавка (УППФ-3М)	Вакуумно-термический переплав с использованием направленного затвердевания (ПМП-4М)	Вакуумно-индукционная плавка (УППФ-2) с применением пенокерамических питателей «дождевого» типа
			
после литья, ×200			
			
после т/о, ×500			
выход годного, % (50 % отходов)			
68	85	78	81

На сегодняшний день разрабатывается технология получения литых деталей ГТД с применением питателей «дождевого типа» с учетом результатов настоящих исследований.



Список литературы

1. Квасницкая Ю. Г. Специальная конструкция многоуровневой формы с фильтрацией расплава для утилизации суперсплавов // Процессы литья. - 2001. - № 1. - С. 68-74.
2. Аникин Ю. Ф., Максютя И. И., Квасницкая Ю. Г., Вербило М. А. Регенерация отходов жаропрочных сплавов методами вакуумных переплавов // Пробл. спец. электрометаллургии. - 2002. - № 1. - С. 37-39.
3. Максютя И. И., Квасницкая Ю. Г., Симановский В. М. Повышение коэффициента использования отходов жаропрочных сплавов методами электрометаллургии // Современная электрометаллургия. - 2007. - № 1. - С. 51-55
4. Староверов Ю. С., Чернов Ю. А. Применение пенокерамических фильтров в литейном и сталеплавильном производствах за рубежом // Огнеупоры. - 1992. - № 1. - С. 38-40.
5. Ali S., Martharasan R., Apelia D. The cleaning steels by filtration // Metallurgical Transactions. - 1985. - V. 168, № 4. - P. 725-742.

6. Brockmeyer J. W., Aubrey L. S. Application of ceramic foam filter in molten metal filtration // Ceramic Eng. Sci. Proc. - 1987. - V. 8, № 1-2. - P. 63-67.
7. Ренях С. И. Технологические основы литья по выплавляемым моделям. – Днепропетровск: Лира ЛТД, 2006. - 1056 с.

Поступила 03.03.09

удк 621.74.047

В. А. Середенко, Е. В. Середенко

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ВНЕДРЕНИЕ СТРУЙ МЕТАЛЛОВ В ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ СРЕДЫ С МЕНЬШЕЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ

Рассмотрены некоторые физические особенности технологических процессов, базирующихся на взаимодействии неизотермических расплавов при получении сплавов и литых изделий. Исследован ряд характерных вариантов внедрения металлических струй в расплавленные металлы с различными температурами, плотностью и теплопроводностью. В критериальной форме определены основные рациональные физические параметры проведения процессов приготовления сплавов методом смешения, суспензионного литья с использованием охлаждающих жидкостей, получения шарообразных и непрерывнолитых тел в жидкометаллической среде.

Розглянуто деякі фізичні особливості технологічних процесів, які базуються на взаємодії неизотермічних расплавів при отриманні сплавів і литих виробів. Досліджено ряд характерних варіантів впровадження металевих струменів у розплавлені метали з різними температурами, густиною і теплопровідністю. В критеріальній формі визначено основні раціональні фізичні параметри проведення процесів приготування сплавів методом змішення, суспензійного лиття з використанням охолоджуючих рідин, отримання кулястих та безперервнолитих тіл у рідкометалевому середовищі.

Some physical peculiarities of the technological processes based on interaction between non-isothermal melts in alloys and cast wares production were concerned. The number of characteristic variants introducing of the metallic jets into the melted metals with different temperatures, density and heat conductivity was investigated. Major rational physical parameters of process conducting for alloys production by mixing, suspension casting in make use of cooling liquids and production of spheroidal from bodies and continual casted ones in the liquid metallic medium were defined in criterion from.

Ключевые слова: внедрение, струи, металлы, охлаждающие расплавы

Взаимодействие струй металлов с другими расплавами, отличающихся, как правило, температурами нагрева, характерно для технологий получения сплавов методом смешения [1], легирования и раскисления стали жидкими металлами и сплавами [2, 3], процесса суспензионного способа литья слитков с применением жидких охлаждающих сред [4, 5], изготовления металлических шаров в охлаждающих расплавах [6], диспергирования струй металлов в менее нагретых расплавах при модифицировании сплавов [7] и получении гранул [8], непрерывной разливки стали в “мягкие кристаллизаторы” [9] и ванны с жидкометаллическим охладителем [10, 11].

Указанные процессы получения сплавов и литых изделий требуют учета ряда физических особенностей взаимодействия жидких металлов. Так, технологии на основе метода смешения требуют обеспечения активного гидродинамического взаимодействия жидких металлических компонентов во всем объеме расплава. Для реализации этого необходимы