

**И. И. Максютя, Ю. Г. Квасницкая, Г. Ф. Мьяльница\*,  
Е. В. Михнян, А. В. Нейма**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

\* ГП НПКГ «Зоря»–«Машпроект», Николаев

## **ПРИМЕНЕНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ ПРИ ВЫПЛАВКЕ ЗАГОТОВОК ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ**

*В ФТИМС НАНУ предложено модифицирование огнеупорной керамики металлическим порошком алюминия с целью повышения прочности пенокерамических фильтров на основе корунда. Разработанные материалы для фильтрующих узлов используют в процессе переплавов литейного возврата (кондиционного и некондиционного) жаропрочных сплавов для лопаточных материалов стационарных и транспортных газотурбинных установок (ГТУ). Показано, что применение пенокерамических фильтров при получении литых заготовок из жаропрочного сплава позволяет значительно снизить (в 1,5-1,8 раза) загрязненность их неметаллическими включениями, газами, вредными примесями. Это обуславливает большую стабильность показателей механических свойств и повышение пластических характеристик сплава, при этом снижается трудоемкость финишной обработки отливок и повышается экономия металла.*

**Ключевые слова:** пенокерамический фильтр, жаропрочный сплав, неметаллические включения, механические характеристики.

*У ФТИМС НАНУ запропоновано модифіковання вогнетривкої кераміки металевим порошком алюмінію з метою підвищення міцності пінокерамічних фільтрів на основі корунду. Розроблені матеріали для фільтруючих вузлів використовують в процесі переплаву звороту ливарного виробництва (кондиційного та некондиційного) жароміцних сплавів для лопаткових матеріалів стаціонарних та транспортних газотурбінних установок (ГТУ). Показано, що використання пінокерамічних фільтрів при отриманні литих заготовок із жаростійкого сплаву дозволяє значно знизити (в 1,5-1,8 рази) забрудненість їх неметалевими включеннями, газами, шкідливими домішками. Це обумовлює більшу стабільність показників механічних властивостей та підвищення пластичних характеристик сплаву, при цьому знижується трудомісткість фінішної обробки виливків та підвищується економія металу.*

**Ключові слова:** пінокерамічний фільтр, жароміцний сплав, неметалеві включення, механічні характеристики.

*To increase the strength of ceramic foam filters in PTIMA NASU the modified aluminum metal powder. The materials developed for the filter units are designed for use in the process of remelting foundry return (conditioned and unconditioned) superalloy blade materials for stationary and mobile gas turbines (GT). It is shown that the use of ceramic foam filters in the preparation of castings of superalloy can significantly reduce (by 1.5-1.8 times) contamination of non-metallic inclusions and gases that are harmful impurities. This makes it more stable performance of the mechanical properties and increase the plastic characteristics of the alloy reduces the complexity of the finish machining of castings and improved economy of metal.*

**Keywords:** Ceramic foam filter, superalloy, nonmetallic inclusions, mechanical characteristics.

**П**рименение керамического фильтрования как метода снижения неметаллических включений, газов, вредных примесных элементов при получении литых заготовок из жаропрочных сплавов на никелевой, кобальтовой, железной основах в газотурбостроении (например, сложнопрофильных рабочих и сопловых лопаток

компрессоров), регламентируемого технологическим процессом, сдерживается в настоящее время при серийном производстве небольшой номенклатурой высококачественных отечественных керамических фильтров.

Многолетней практикой литейного производства установлено, что огнеупорные смеси на основе оксида алюминия и циркония являются материалами для фильтров, отвечающими в наибольшей степени требованиям термической и химической стойкости к воздействиям многокомпонентных высокотемпературных расплавов жаропрочных и жаростойких сплавов, к тому же экономически целесообразным [1-6].

При фильтрации жидких металлов и сплавов последние пропускают через слой огнеупора с развитой поверхностью (в отечественной научно-патентной литературе этот метод носит название «Фирам-процесс» [1, 2]). Этот способ впервые применяли к магниевым и алюминиевым сплавам, а затем к медным и цинковым, но, начиная с 80-х годов, его стали использовать к более высокотемпературным расплавам для очистки от неметаллических включений (НВ) путем первоначального отделения частиц неметаллической фазы с последующим их оседанием на стенках фильтра (пенного либо прямоканального).

Анализ научно-патентной литературы последних лет показал, что наибольшее распространение для рафинирования жаропрочных сплавов получили так называемые «пенокерамические фильтры» (ПКФ) с пористостью до 90 % и размером пор 0,5-5,0 мм, изготавливаемые пропиткой вспененного полиуретана керамической суспензией с последующим выдавливанием ее излишка, сушкой и обжигом [3-6]. Пенокерамические фильтры имеют случайное распределение пор, число которых может составлять 4-10 на 1 см<sup>2</sup>. Такие фильтры выпускают фирмы США, Великобритании, Германии, Японии, Республики Корея и других стран, в частности, Ceramic Foam Filter Division Consolidated Aluminium Corporeishen (США), Henderson (США), Celee Corporeishen (США), Fosco, Posco (Республика Корея). Служебные характеристики фильтров оценивают по максимально допустимой температуре фильтрации, термостойкости и механической прочности.

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.

Следует отметить, что при рафинировании жидкого расплава фильтром могут задерживаться только первичные и вторичные НВ, поскольку после фильтрации металл должен иметь температуру несколько выше температуры ликвидуса. А так как сульфидные включения образуются в процессе затвердевания, то при фильтровании сплав может быть очищен прежде всего от оксидных, нитридных и карбидных включений.

Анализируя большое число научных публикаций, посвященных теории фильтрации расплавов [3 - 5], можно считать, что наиболее полной является математическая модель процесса фильтрации, описываемая уравнением

$$\eta = \left[ 1 - \exp \left( - \frac{k S_{\Phi} H_0}{V} \right) \right] \left( 1 - \frac{C_{\text{рав}}}{C_{\text{исх}}} \right),$$

где  $\eta = \frac{C_{\text{исх}} - C}{C_{\text{исх}}}$  – степень фильтрации;  $C_{\text{исх}}$ ,  $C$  – концентрация неметаллических

включений до и после фильтрации, кг/ м<sup>3</sup>;  $C_{\text{рав}}$  – равновесная концентрация при-

месей в расплаве, кг/м<sup>3</sup>;  $k$  – коэффициент скорости процесса удаления примесей, м/с;  $S_{\phi}$  – удельная поверхность ПКФ, м<sup>-1</sup>;  $H_0$  – 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;  $\rho$  – плотность заливаемого сплава, кг/м<sup>3</sup>;  $\tau$  – время заливки, с;  $S_0$  – площадь фильтра, м<sup>2</sup>.

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

Учитывая высокую пористость и низкую плотность 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, и включает следующие основные операции: подготовка модельного состава необходимых размеров, приготовление керамической суспензии, пропитка модели суспензией, удаление излишков суспензии, сушка и спекание фильтра.

В целом, учитывая анализ научной литературы по применению в качестве материалов ПКФ и подтвержденную экспериментально термодинамическую оценку вероятности осаждения существующих в металле включений на поверхности фильтра, а также принимая во внимание экономическую целесообразность, термостойкость материалов и его механическую прочность, в данной работе предлагаются материалы на основе корунда и циркона с применением модификаторов, а в качестве связующих – гидролизованый этилсиликат и фосфатные связующие.

Теоретические исследования показали, что химическим сродством к оксидам, входящим в состав таких НВ, как  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $CaO$ ,  $MgO$ , при температуре в области 1500 °С обладают огнеупорные материалы на основе  $MgO$ ,  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  [2, 8, 9].

Для изготовления такого типа фильтров в ФТИМС НАНУ на основе многолетних исследований предложили модифицированную металлическими порошками огнеупорную керамику с повышенной термической стойкостью в диапазоне температур солидус-ликвидус жаропрочных сталей и сплавов на основе никеля и кобальта. Разработанные материалы для фильтрующих узлов предназначены, главным образом, для использования в процессе переплавов литейного возврата (кондиционного и некондиционного) жаропрочных сплавов для лопаточных материалов стационарных и транспортных газотурбинных установок (ГТУ).

*Целью разработки*, предложенной в ФТИМС НАНУ, являлось повышение прочности существующих в промышленности пенокерамических фильтров. Поставленная цель была достигнута тем, что в смесь для изготовления пенокерамических фильтров, которая содержит огнеупорный наполнитель – электрокорунд, оксидал, каолин, алюмохромфосфатное связующее, в качестве прочностной добавки был введен мелкодисперсный металлический порошок алюминия 0,5-5,0 %мас. (марка АСД-4) при следующем соотношении компонентов, %мас.: электрокорунд – 30,2-48,8; оксидал – 4,0-6,0; каолин – 0,8-1,2; алюмохромфосфатное связующее – 36-54; водная акриловая эмульсия (концентрация 45-52 %) – 4,0-6,0.

Прочность пенокерамических фильтров при применении такого состава смеси повышается за счет того, что при реактивном взаимодействии алюминия с корундом образуется дополнительное количество оксида алюминия, вступающего во взаимодействие с наполнителем и продуктами разложения связующего. Количество алюминия менее чем 0,5 % недостаточно повышает прочность пенокерамических фильтров, а при увеличении количества алюминия до 5 %мас. достигается достаточная для пенокерамических фильтров прочность (табл. 1).

**Таблица 1. Составы и характеристики материалов для фильтров**

ГрЭТС, %	Корунд, %мас.	Al АСД-4, %мас.	$\sigma_{изг}$ , МПа	Пористость, %	Плотность, г/см <sup>3</sup>
27±0,5	68±0,5	5±0,1	4,5±0,1	85±2	0,5

Технология приготовления пенокерамических фильтров не отличалась от принятой [2] и заключалась в том, что керамический шликер гомогенизируют, заполняют емкость с заготовкой из органической пены, проводят пропитку заготовки в режиме циклической деформации до полного поглощения керамического шликера, осуществляют сушку и обжиг при температурах не менее температуры эксплуатации изделий.

При переплаве кондиционных и некондиционных отходов нескольких марок сплавов с целью экспериментального опробования эффективности фильтрации расплава изготовленный фильтр устанавливали в нижнюю часть керамической воронки, зазор между фильтром и поверхностью воронки промазывали раствором и сушили. Воронку с фильтром помещали в пустую опоку, пространство между стенками опоки и керамической воронкой засыпали теплоизолирующей засыпкой из пеншамота. Воронку с фильтром прокаливали пламенем газовой горелки до 900 - 1000 °С. Процесс прогрева продолжался не менее 1 ч и предшествовал заливке расплава в воронку.

Кондиционный и некондиционный возврат жаропрочных сплавов различных марок типа ЧС расплавляли в мерном алундовом тигле в вакуумной индукционной печи УППФ-2 и затем заливали в воронку с фильтром. В каждом опыте изменяли температуру заливки металла и температуру подогрева воронки с фильтром. Результаты экспериментов представлены в табл. 2.

**Таблица 2. Влияние температуры подогрева фильтра и металлического расплава на работоспособность фильтрующей системы**

Толщина фильтра, мм	Диаметр пор, мм	Температура, °С		Марка воз- врата ЧС 104	Марка возврата ЧС 88 У
		фильтраци- онный узел	расплав		
40	3	900	1550	частично застывает	частично застывает
40	2	900	1550	застывает	частично застывает
40	1	900	1550	застывает	застывает
30	3	930	1550	проходит че- рез фильтр	проходит через фильтр
30	2	930	1550	частично застывает	частично про- ходит
30	1	930	1550	частично застывает	проходит через фильтр
20	3	950	1510	проходит че- рез фильтр	проходит через фильтр
20	2	950	1510	проходит че- рез фильтр	частично про- ходит
20	1	950	1510	частично проходит	частично застывает

Как следует из полученных результатов, значимым параметром является не только диаметр пор, но и жидкотекучесть расплава, которая контролируется температурой сплава и подогрева фильтра. Поскольку нежелателен перегрев металла значительно выше температуры ликвидуса, решающую роль играет температура фильтра. Оказалось, что для обеих марок недостаточно 900 °С, минимальной температурой подогрева следует считать 950 °С. Размер пор 1 мм оказался недостаточно технологичным и оптимальным для керамических фильтров; для жаропрочных сплавов рассматриваемого типа достаточным следует считать 2-3 мм, а температура подогрева фильтра должна быть не менее 950 °С. Очевидно, чем меньше диаметр поры (выше пористость), тем лучше фильтрующий эффект, но при этом увеличивается сопротивление фильтра потоку металла, вплоть до застывания (табл. 3, 4).

**Таблица 3. Влияние фильтрации на характеристики НВ сплава ЧС 104 (толщина фильтра 20 мм, диаметр пор 2 мм,  $T_{распл} = 1510$  °С,  $T_{фильтра} = 950$  °С; 100 % кондиционного литейного возврата)**

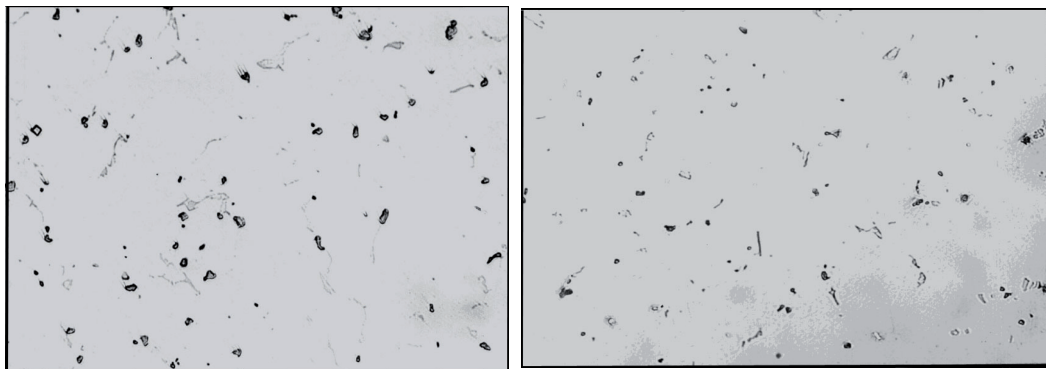
Тип переплава	Объемное содержание неметаллических включений, %	Среднее количество включений на 1 мм <sup>2</sup> (край отливки / середина отливки)
ВИП→ВИП без фильтра	6,5 - 8,79	48 / 35
ВИП→ВИП с фильтром	4,1 - 5,5	32 / 20
ВИП→НК без фильтра	5,2 - 7,4	44 / 32
ВИП→НК с фильтром	3,2 - 4,8	29 / 18

**Таблица 4. Сравнительный анализ свойств сплавов, полученных при рафинировании отходов по схемам переплава ВИП (числитель) и ВИП→ВИП+фильтр (знаменатель)**

Сплав	Содержание газов, %мас.			$\sigma_{в,}$ МПа при $T_{исп} = 950$ °С	$\delta,$ %
	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>		
ЧС 104	0,0026	0,00014	0,0023	450	8-11
	0,0017	0,00010	0,0019	465	9-13
ЧС 88 У	0,0029	0,00011	0,0024	640	8-10
	0,0019	0,00009	0,0017	680	10-12

На рисунке представлена микроструктура сплава (неметаллические включения) в сплаве ЧС 104 до и после переплава с использованием фильтрации, что позволяет иллюстрировать данные табл 3.

В отливках, полученных при переплаве отходов обеих марок без фильтрации, идентификация НВ показала, что они представляют собой скопления нитридных частиц размером 0,5-2,5 мкм. Такие скопления могли сформироваться лишь за счет коагуляции частиц в жидком расплаве. Присутствие их является причиной образования в отливках дефектов типа «звездное небо», которые значительно понижают не только механические свойства, так как нарушают сплошность металлической матрицы, но и являются очагами зарождения трещин, следствием чего может стать поверхностное разрушение деталей ГТД.



а

б

Микроструктура сплава ЧС104 (а) до и после фильтрации (б),  $\times 100$

### Выводы

При изготовлении отливок из фильтрованного сплава общая загрязненность его НВ и газами снижается в 1,5-1,8 раза, при этом удаляются включения разных размеров. Это обуславливает большую стабильность показателей механических свойств и повышение пластических характеристик сплава, при этом снижается трудоемкость финишной обработки отливок и повышается экономия металла.



### Список литературы

1. Каблов Е. Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей. – М.: МИСИС, 2001. – 632 с.
2. Репях С. И. Технологические основы литья по выплавляемым моделям. – Днепропетровск: Лира ЛТД, 2006. – 1056 с.
3. Староверов Ю. С., Чернов Ю. А. Применение пенокерамических фильтров в литейном и сталеплавильном производстве за рубежом // Огнеупоры. – 1992. – № 1. – С. 38-40.
4. Ali S., Martharasan R., Apelia D. The Clining Steels by Filtration // Metallurgical Transactions. – 1985. – V. 168, № 4. – P. 725-742.
5. Леонов А. Н., Децко М. М. Теория проектирования пенокерамических фильтров для очистки расплавов металлов // Огнеупоры и техническая керамика. – 1999. – № 12. – С. 14-20.
6. Тен Э. Б. Вклад литейщиков МИСИС в развитие теории и технологии фильтрационного рафинирования жидких металлов // Литейн. пр-во. – 2000. – № 9. – С. 11-13.
7. 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.
8. Сімановський В. М. Теорія та технологія модифікування формувальних сумішей для вилітків зі спеціальних сплавів: Автореф. дис. д-ра техн. наук. – Київ: ФТІМС НАНУ, 2008. – 36 с.
9. Керамические стержни и фильтрующие элементы для литья охлаждаемых лопаток ГТД / В. М. Симановский, И. И. Максютя, Ю. Г. Квасницкая и др. // Процессы литья. – 2009. – № 1. – С. 43-47
10. Получение ориентированной структуры в отливках из жаропрочного никелевого сплава, легированного рением / Г. Ф. Мьяльница, И. И. Максютя, Ю. Г. Квасницкая и др. // Там же. – 2012. – № 6. – С. 54-61.

Поступила 17.10.2013