

Рафінування розплавів жароміцних сплавів при литті деталей ГТД в оболонкові форми, отриманні за пінополістироловими моделями

О. Й. Шинський, доктор технічних наук, професор, завідувач відділу

Ю. Г. Квасницька, доктор технічних наук, провідний науковий співробітник

І. І. Максютя, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

О. В. Нейма, молодший науковий співробітник, neima_alex@ukr.net

О. В. Михнян, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

Мінімізацію забруднення розплаву жароміцних сплавів від надлишкового вмісту газів, неметалевих вкраплень під час кристалізації при отриманні деталей ГТД забезпечує проведений авторами емпіричний вибір термічних умов та технічних параметрів пінокерамічних фільтрів (поруватість, товщина, діаметр пор) при внутрішньоформеному фільтруванні. Використання розробленого за участю авторів складу більш хімічно- та термічно стійкої вогнетривкої ливарної кераміки (фільтри, форми, тиглі) також запобігає забрудненню розплаву домішковими елементами. Сумарний вміст неметалевих вкраплень знизився у 1,3 – 1,6 разів, масова частка газів, (кисень, водень, азот) %, у виливках, зменшилась у 1,5 – 2,0 рази для обох типів сплавів.

Випробувана авторами при виготовленні форм заміна методу лиття за моделями, що витоплюються (спосіб ЛВМ), на використання пінополістиролових моделей, які випалюються, дає змогу запобігти можливої деформації низькоплавкої воскоєміщуючої моделі для достатньо габаритних деталей та знизити вибракування деталей за розмірною точністю при одночасному поліпшенні чистоти поверхні виливка.

Запропоноване комплексне використання внутрішньоформеного фільтраційного рафінування розплавів при заливанні в оболонкові форми, виготовлені за комбінованою технологією з використанням пінополістиролових та воскоємісних моделей, дало можливість за рахунок оптимізації структурних складових при рафінуванні розплаву від неметалевих вкраплень та газів, отримати складнопрофільні деталі з підвищеним комплексом експлуатаційних характеристик. Тимчасовий опір при температурі випробувань 900 °С та відносне подовження зросло від 650 до 690 МПа та з 9 до 14 %, відповідно, для сплаву СМ104–ВІІ + (Ta + Re), та з 750 до 780 МПа та з 15 до 19 %, відповідно, для сплаву СМ88У + (Ta + Re).

Ключові слова: жароміцні сплави, рафінування, пінокерамічний фільтр, пінополістиролові моделі, оболонкові форми, комбінований спосіб лиття.

Широкого застосовування в практиці газотурбобудування при отриманні робочих і соплових лопаток газотурбінних двигунів (ГТД) набули вітчизняні та закордонні жароміцні сплави (в іноземній літературі – “суперсплави”) на нікель-хромовій та кобальто-хромовій основі [1–5].

Відомо, що під час виплавляння сплавів цього класу за умов вакуумної плавки може досить повно реалізуватися процес дегазації розплавів, випаровування кольорових металів з підвищеною пружністю пари та очищення від неметалевих вкраплень (НВ), що сприяє підвищенню рівня фізико-механічних властивостей литих деталей. Однак, відомо, що особливо шкідливі домішкові елементи, які попадають в сплави з шихтовими матеріалами, не випаровуються і здатні утворювати з компонентами сплавів сполуки, що стають концентраторами напружень та ініціюють зародження тріщин під час експлуатації деталей. Тому закордонні виробники жароміцних сплавів використовують стандарт AMS-2280A, що встановлює верхню межу особливо шкідливих елементів I класу: Pb – 5 ppm (0,0005 % мас.); Bi – 0,5 ppm; Se – 3 ppm; Te – 0,5 ppm, Tl – 5 ppm. Для ще 15 елементів цей стандарт встановлює верхню межу 50 ppm кожного, а сумарна їх кількість в сплаві не повинна перевищувати 400 ppm. До таких елементів відносяться: Sb, As, Cd, Au, Na, K, Ag, Sn, Zn. На властивості жароміцних сплавів негативно впливають також такі елементи, як Li, Mg, Ca, Ba, Be, Pt, Sr, які є домішками у використовуваних шихтових матеріалах. Їх вміст в сплавах не обговорюється, оскільки встановлено, що вони легко виводяться з розплаву в процесі виплавлення. До домішкових елементів відносяться також РЗМ та Y, лантаніди (La, Ce, Yb, Er, Pr, Eu і Cd). Але ці елементи у вітчизняній практиці у вигляді спеціальних лігатур застосовуються при виплавці сплавів, як добавки. Їх кількість строго дозується під час виплавки.

Керамічні вогнетривкі матеріали ливарної оснастки також є можливим джерелом внесення шкідливих металів, наприклад: Pb, Bi, Sn, Si та інші. У відповідності з діючою вітчизняною регуляторною галузевою документацією ці домішки не підлягають контролю. Однак, у провідних світових фірмах-виробниках вміст цих елементів у вогнетривах регламентують. Так, наприклад, згідно діючим технічним умовам CP-1257 фірми “Howmet” (США), концентрація домішок кольорових металів в електрокорунді не повинна перевищувати, (% мас.): Pb – 0,0025, Bi – 0,0001, Sn – 0,0025, Zn – 0,0025. Тому важливе значення для зберігання ефекту рафінування під час плавлення та кристалізації заготовки має розробка більш термостабільних керамічних матеріалів [5].

Зростаючі вимоги до експлуатаційних характеристик литих деталей ГТД змушують відшуковувати резерви, що дозволяють скоротити кількість шкідливих домішкових елементів, неметалевих вкраплень, газів у розплаві в період заповнення їм порожнини ливарної форми. Така технологічна можливість з'являється при внутрішньоформенному фільтраційному очищенні розплаву за допомогою фільтруючих вузлів з пінокерамічними фільтрами, макроструктура яких представляє ретикулярно розміщені пори (0,5 – 5,0 мм) з перешийками поміж ними, поруватістю до 90 %. Ефективність очищення розплаву під час заливання обумовлена, перед усім, силами адгезії (велика питома поверхня, хороша змочуваність), а також внутрішньою лабіринтною структурою фільтра, яка здатна забезпечити високий коефіцієнт масообміну поміж розплавом та поверхнею фільтра [6, 7].

Слід зазначити, що дослідження, які протягом багатьох років здійснюються у ФТІМС НАН України, а саме, з розробки технології отримання складнопрофільних виливків з жароміцних сплавів, зосереджені як на оптимізації складу нових сплавів для деталей ГТД (робочі та соплові лопатки компресорів), так і на вдосконаленні нового покоління більш хімічно- та термічностійких вогнетривів з моно- та комплексним модифікуванням керамічної основи (зокрема, на основі корунду, кварцу), дисперсними порошками металів з метою утворення більш стійких сполук. Це дало змогу значно покращити експлуатаційні властивості форм, тиглів, стрижнів та фільтраційних вузлів пінокерамічного типу [5, 7 – 10].

На сьогодні основний технологічний процес отримання литих деталей спеціального призначення із вищезазначених сплавів заснований на використанні керамічної форми, «оболонку» якої отримують за допомогою воскової моделі, що виплавляється (спосіб ЛВМ) [1, 4]. Цей метод забезпечує виготовлення виливків з високим класом розмірної точності і хорошою якістю поверхні зі складними внутрішніми каналами, однак потребує врахування усадки воскоподібних модельних матеріалів. Крім того, в процесі виготовлення форм використовуються зв'язуючі, які містять кремній (етилсилікат, кремнезолі). Тому, при кристалізації розплаву при заливанні в форми відбувається активна взаємодія утвореного оксиду кремнію з компонентами сплавів, значно знижуючи їх характеристики [5]. Як показує аналіз сучасних тенденцій розвитку ливарного виробництва, досить перспективною є технологія отримання точних виробів за пінополістироловими (ППС) газифікованими моделями в оболонкових керамічних формах [11, 12]. Проте, істотним недоліком таких моделей є те, що за високих температур під час газифікації моделей відбувається насичення поверхні форми, та як наслідок і виливків, продуктами згоряння з виділеннями фракцій, основою яких є сполуки вуглецю. Тому, при розробленні технології отримання фасонних виливків зі складнолегованих жароміцних сплавів було поставлено завдання пошуку технологічно доцільного процесу видалення ППС-моделей і продуктів їх деструкції з керамічних форм перед заливанням, що забезпечить мінімізацію забруднення розплаву при кристалізації від надлишкового вмісту газів та науглецювання сплаву при збереженні основних етапів виготовлення форм, прийнятих для підприємств галузі.

Метою дослідження було розроблення комплексного технологічного процесу, що включає цикли виплавляння, рафінування розплаву з використанням внутрішньоформенного фільтрування через пінокерамічний фільтр та кристалізацію виливків в оболонковій формі, виготовленої за допомогою ППС-моделей, що видаляються за комбінованою технологією, яка поєднує переваги ЛВМ та випалювання ППС-моделей.

Дослідження проведені на серійних жароміцних сплавах типу ХН57КВТЮМБЛ (марка СМ104-ВИ) та типу ХН57КВЮТМБРЛ (марка СМ88У) для суднових, та енергетичних ГТД, хімічні склади яких за участю авторів сумісно зі спеціалістами ДП НВКГ «Зоря»- «МАШПРОЕКТ»

Плавлення і кристалізація

(м. Миколаїв), були оптимізовані додатковим легуванням Ta і Re (табл. 1) та випробувані в промислових умовах [13, 14].

Таблиця 1

Хімічний склад жароміцних корозійностійких сплавів на нікелевій основі

Сплав	Масова частка елементів, %													Мікро легуючі елементи
	C	Cr	Co	W	Mo	Ti	Al	Nb	Hf	Re	Ta	B	Zr	
CM88Y	0,07	15,8	11,7	5,3	1,96	4,6	3,0	0,15	0,3	-	-	0,090	-	Fe - 0,50
CM88Y + (Ta+Re)	0,07	13,2	7,5	6,6	1,40	2,3	3,5	0,50	-	4,3	4,3	0,009	0,05	-
CM104-ВИ	0,10	21,0	11,0	3,5	0,60	3,5	2,5	0,25	-	-	-	0,015	0,03	-
CM104-ВИ + (Ta+Re)	0,10	20,0	11,0	3,5	0,40	3,5	2,5	0,25	-	3,0	3,0	0,015	0,03	Y - 0,03

На ливарному агрегаті УППФ-2 зі сплавів виготовляли циліндричні заготовки, зразки-свідки та робочі деталі компресорів (робочі та соплові лопатки ГТД) для контролю хімічного складу, структурно-фазових особливостей, ступеня рафінованості, а також фізико-механічних характеристик. Швидкість заливки розплаву у форми від 5 до 12 кг/с, контроль температури термопарою та оптичним пірометром типу Mikron (модель М-780).

Хімічний склад виливків із запропонованих сплавів визначали за допомогою аналітичного комплексу зі скануючого електронного мікроскопу JSM-35CF фірми «JEOL» (Японія) і рентгенівського спектрометра з дисперсією по енергії рентгенівських квантів (модель INCA Energy-350 фірми «Oxford Instruments», Великобританія). Шліфи для металографічних досліджень піддавали хімічному травленню. Для визначення кількості інтерметалідної, карбідної та боридної фаз шліфи оброблювали нагрітим розчином Мураками: $K_3Fe_3(CN)_6$ – 10 г, КОН – 10 г, H_2O – 50 мл. Розмір, форму часток первинної та вторинної γ' -фази $Ni_3(Al,Ti)$ та карбідів, а також їх розподіл в металі встановлювали за допомогою електронного мікроскопу та вугільних реплік методом екстрагування фаз. Фазовий аналіз сплавів здійснювали електрохімічною ізоляцією інтерметалідних та карбідних фаз в метаноловому травнику з наступним рентгеноструктурним і хімічним аналізом анодних осадів. Розподілення легуючих елементів між фазами вивчали на мікроаналізаторах JXA8600 фірми JEOL (Японія) і Cameca-MS46 фірми CAMECA (Франція) зі збільшенням $400 \div 4000$ крат. Вміст газів (кисню, азоту, водню) вуглецю та сірки у сплаві визначали на аналізаторах фірми «Лесо» (США). Об'ємну частку та розмір фазових складових визначали на растровому мікроскопі JSM-840. Відносна точність вимірів складала 5 – 10 %.

Моделі деталей виготовлялися з двох типів ППС: блочного пінополістиролу марки ПСБ-25 (EPS-EN13163) за ДСТУ Б EN 13163-2013

щільністю 25 кг/м³ і більш міцнішого екструдованого ППС марки 4000 CS (XPS CTO 72746455-3.3.1–2012) щільністю 35 кг/м³.

Для запобігання надлишкового науглецювання виливків, спричинених термодеструкцією ППС, авторами запропоновано комбіноване застосування методу ЛВМ і випалювання ППС. При цьому способі ливникова система включала, у тому числі, надливну чашу з розподільною воронкою та вбудований у неї пінокерамічний фільтр з поруватістю до 85 % з розробленого за участю авторів більш термічно- та хімічно стійкого складу кераміки [15, 16].

Дослідження процесу випалювання різного типу ППС, що проводились за участю авторів статті та інформація з наукових видань, показують, що утворені тверді частки являють собою частинки вуглецю, а суміш газів, що видаляється під час випалювання ППС-моделей, складається з CH₄, C₂H₄, C₃H₆ та інших, а також з водню, оксиду вуглецю та азоту [11, 12, 17, 18].

Форму висушували в шафі при температурі 200 °С, прожарювали при 850 – 900 °С в камерній печі 8– 10 годин з наступним заливанням сплавами CM88Y + (Ta + Re) та CM104-ВІ + (Ta + Re) в ливарній установці УППФ-2 після вакуумно-індукційного переплаву (ВІП), відповідно до прийнятого на підприємстві регламенту та встановлених авторами температур фазових перетворень – T_L, °С, T_S, °С (табл. 2), що визначені за допомогою диференційної скануючої калориметрії на синхронному термічному аналізаторі STA 449F1 німецької фірми NETZSCH за спеціально розробленою методикою з точністю вимірювання ±1,5 °С.

Таблиця 2

Фізико-хімічні характеристики дослідних сплавів

Характеристики сплаву	Об'єм γ'-фази у структурі сплаву, %	Температура розчинення γ'-фази	Температура ліквідус T _L , °С	Температура солідус, T _S , °С
CM104-ВІ + (Ta + Re)	41,5	1185	1350	1245
CM88Y + (Ta + Re)	45,2	1203	1389	1284

В таблиці 3 представлені одержані результати дослідження впливу температури розплаву та підігріву фільтра в залежності від його параметрів на межу закупорювання каналів, тобто працездатність фільтра при рафінуванні. За результатами було вибрано найбільш технологічний варіант: діаметр пор (комірки) 2 мм при товщині фільтра 20 мм, початкова температура підігріву фільтра T_{фільтра} – 950 °С, Трозплаву – 1550 °С для обох типів сплаву.

При фільтрації металевих розплавів, у яких умовний діаметр НВ, переважно, перевищує 1 мкм, ефекти дифузійного та інерційного осадження

Таблиця 3

Вплив температури підігріву фільтра та металевого розплаву на межу працездатності фільтруючої системи

Товщина фільтра, мм	Діаметр пор, мм	Температура, °C		Марка СМ104-ВІ + (Ta+Re)	Марка СМ88У + (Ta+Re)
		Фільтраційний вузол	Розплав		
40	3	900	1550	Частково застигає	Частково застигає
40	2	900	1550	Застигає	Частково застигає
40	1	900	1550	Застигає	Застигає
30	3	930	1550	Проходить через фільтр	Проходить через фільтр
30	2	930	1550	Частково застигає	Частково проходить
30	1	930	1550	Частково застигає	Проходить через фільтр
20	3	950	1550	Проходить через фільтр	Частково проходить
20	2	950	1550	Проходить через фільтр	Проходить через фільтр

вкрапель невеликі, тому їх можна не враховувати. Сумарна ефективність рафінування від НВ буде складатися як з проскакування при прямому захваті фільтром НВ, так і з осадження (седиментації) вкрапель.

При заливанні металу в форму через фільтр у вакуумі відбувається інтенсивне, порівняно зі звичайним заповненням, видалення азоту зі сплавів. Це зумовлено збільшеною питомою поверхнею металу при використанні фільтрів. При цьому масова частка азоту в сплавах зменшується на 30 – 40 %, в результаті у виливках спостерігається зниження у 2,5 – 3,0 рази вмісту карбонітрідів і нітридних включень, що складають переважну більшість НВ. Додатково седиментаційний ефект при фільтрації дозволив спостерігати сумарно помітне зниження об'ємної частки НВ в структурі виливків (рис. 1, табл. 4).

Металографічно показано зменшення розміру кристалів (зерна) у зразках після фільтрації, порівняно зі зразками, отриманими за звичайною технологією, що, можливо, є наслідком очищення границь зерен від вкрапель (рис. 2, 3). Ливарних дефектів у вигляді розсіяних раковин усадки не виявлено при всіх режимах фільтрації та заливання.

Відзначимо, що у литому стані структура зразків обох сплавів без фільтрування та після проходження фільтра характеризується

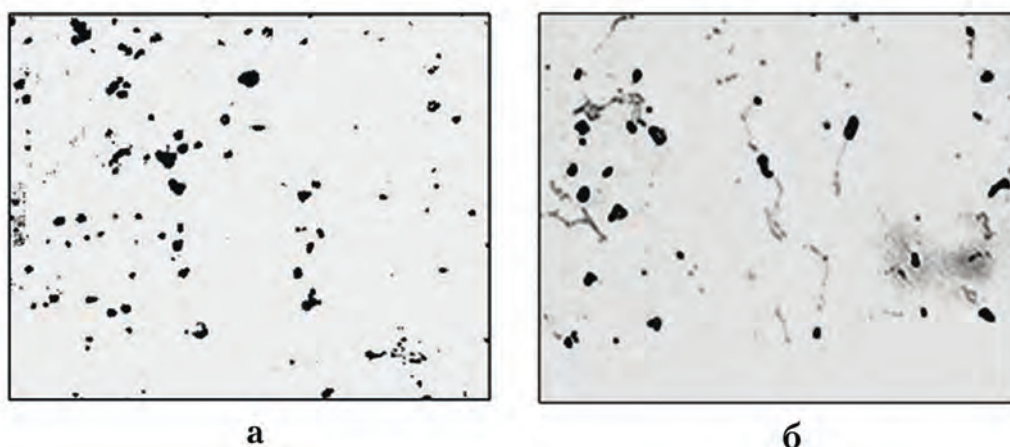


Рис. 1. Неметалеві вкраплення в сплаві СМ104-ВІ + (Та + Re) в стані після лиття. а – до фільтрування; б – після фільтрування. $\times 800$

Таблиця 4

Вплив фільтрування на ефективність рафінування сплавів від неметалевих вкраплень та газів

Тип переплаву	Об'ємний вміст неметалевих вкраплень, %		Середня кількість вкраплень на 1мм^2 (край виливка/середин виливка)		Масова частка газів (кисень, водень, азот) у виливках, %	
	СМ104-ВІ + (Та+Re)	СМ88У + (Та+Re)	СМ104-ВІ + (Та+Re)	СМ88У + (Та+Re)	СМ104-ВІ + (Та+Re)	СМ88У + (Та+Re)
ВІП без фільтра	6,5 - 8,8	7,1 - 8,7	56 / 38	48 / 34	O_2 - 0,0016 H_2 - 0,00014 N_2 - 0,0017	O_2 - 0,0018 H_2 - 0,00017 N_2 - 0,0020
ВІП з фільтром	4,1 - 5, 9	4,1 - 5,3	32 / 20	32 / 28	O_2 - 0,0009 H_2 - 0,00010 N_2 - 0,0008	O_2 - 0,0008 H_2 - 0,00009 N_2 - 0,0007

достатньо чистими, тонкими границями зерен в аустенітній матриці з евтектичними виділеннями $\gamma - \gamma'$ та напівнеперервною сіткою карбідів, що за морфологічними ознаками та даними МРСА ідентифікуються як M_{23}C_6 на основі Cr_{23}C_6 (так звані «китайські ієрогліфи») та поодинокими виділеннями дрібних карбідів МС-типу (на основі Ti , Ta), дисперсними частками зміцнюючої інтерметалідної фази γ' на основі $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$, дрібними неметалевими включеннями різного типу: карбонітриди $\text{Ti}(\text{CN})$, оксиди. На рис. 4 представлені фрагменти мікроструктури зразків сплаву СМ104-ВІ + (Та + Re) з розшифровкою елементного складу основних фаз. Відповідно

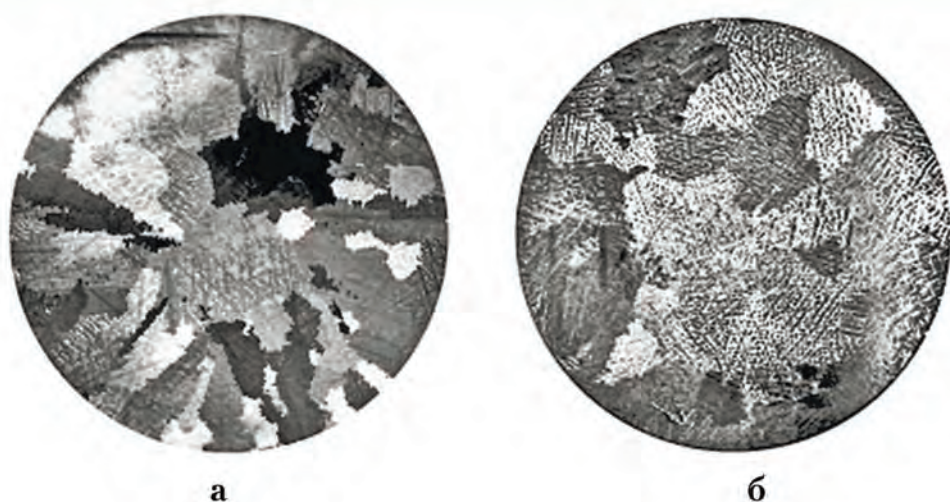


Рис. 2. Макроструктура виливків зі сплаву CM104-ВІ + (Та + Re) в стані після лиття. а – до фільтрування; б – після фільтрування. $\times 4$

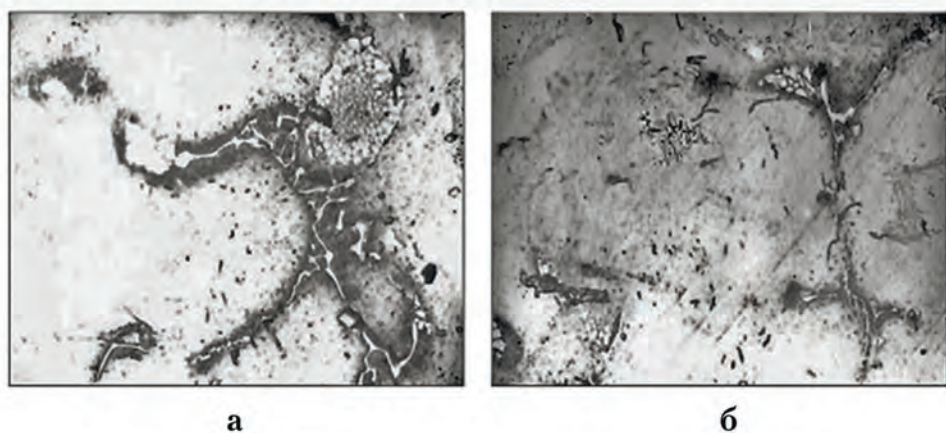


Рис. 3. Мікроструктура виливків зі сплаву CM104-ВІ + (Та + Re) в стані після лиття. а – до фільтрування; б – після фільтрування. $\times 400$.

представленим даним, атоми танталу входять в карбідну фазу типу MC , що сприяє підвищенню температури її плавлення, а атоми ренію легують аустенітну матрицю, тим самим сповільнюючи дифузійну рухливість елементів в сплаві в процесі експлуатації.

Після фільтрування забезпечується зростання на 15 – 20 % пластичності і характеристик міцності обох типів сплавів за кімнатної та при підвищеної температурах.

Результати досліджень сплавів обох типів свідчать про зниження інтенсивності забруднення неметалевими вкрапленнями та газами після внутрішньоформенного фільтрування з використанням пінокерамічних фільтрів розробленого складу та обраного режиму підігріву форм та фільтруючої системи.

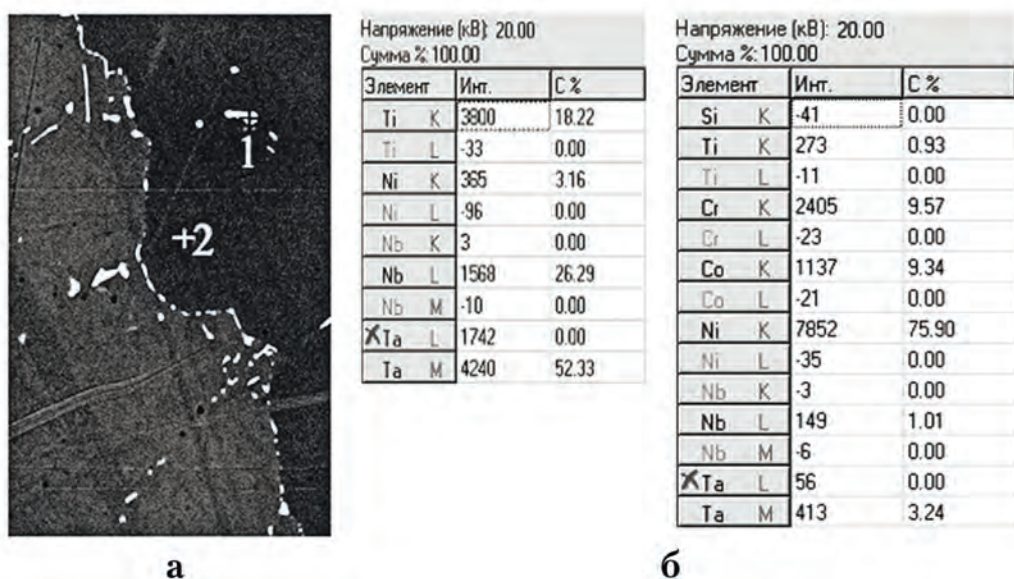


Рис. 4. Фрагмент мікроструктури (а) та хімічний склад (б) досліджуваних ділянок сплаву CM104-ВІ + (Ta + Re), PEM, режим BEI вторинних електронів. 1 – карбід типу MC - (Ta, Nb, Ti, C), 2 – γ -матриця на Ni основі. $\times 1000$.

Внаслідок очищення границь зерен від вкраплень оксидів, оксі- та карбонітридів, спостерігається зменшення розмірів зерна, подрібнення евтектичних виділень $\gamma - \gamma'$. Так, сумарно об'ємний вміст, %, неметалевих вкраплень знизився у 1,3 – 1,6 разів, масова частка газів (кисень, водень, азот) %, у виливках, зменшилась у 1,5 – 2,0 рази. Аналіз хімічного складу зразків виливків для обох типів сплавів після рафінування показав, що кількість основних інгредієнтів знаходиться у межах, заданих регуляторними документами.

Порівняльний аналіз механічних властивостей сплавів після різних методів отримання виливків (зразків) показує, що метал, який додатково проходить рафінування при внутрішньоформенній фільтрації має приріст механічних характеристик: при більш високій пластичності спостерігається зростання міцності. Слід зазначити, що цей ефект спостерігається як за рахунок рафінування при фільтрації розплаву, так і завдяки застосуванню більш хімічно- та термічностійкої кераміки форм, що знижує вірогідність забруднення виливків у процесі кристалізації.

Запропонована комбінована технологія, що включає виготовлення ливникової системи з воскоподібних матеріалів, що витоплюються, та використання ППС моделей, що випалюються для отримання деталей, може сприяти зниженню шорсткості внутрішньої поверхні форми, що сприяє підвищенню розмірної точності виливків (в середньому на 1 – 2 класи), зменшенню трудовитрат на механічну обробку деталей.

Література

1. Каблов Е. Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия). – М.: «МИСИС», 2001. – 632 с.

2. Кишкин С.Т. Создание, исследование и применение жаропрочных сплавов: избранные труды (к 100-летию со дня рождения). – М.: Наука, 2006. – 407 с.
3. Суперсплавы II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок / Под ред. Симса Ч.Т., Столоффа Н.С., Хагеля У.К.: Пер. с англ. В 2 т. / Под ред. Шалина Р.Е.- М.: Металлургия, 1995. – Т.1 – 384 с.
4. Репях С. И. Технологические основы литья по выплавляемым моделям / С. И. Репях. – Днепропетровск: Лира ЛТД, 2006. – 1056 с.
5. Максютя И. И., Кваснищкая Ю. Г., Верховлюк А. М., Михнян Е. В., Левченко Ю. Н. Взаимодействие компонентов в системе «оксид-модификаторы» в корундовой формовочной керамике для деталей с ориентированной структурой // Металл и литьё Украины. – 2017. – № 8– 10. – С. 31–37.
6. Суворов С. А., Тебуев Н. Б. Гидродинамическое моделирование процесса фильтрации расплавов металлов через высокоогнеупорные ячеистые пенокерамические фильтры // Огнеупоры. – 1992. – № 6. – С. 11 – 13.
7. Максютя И. И., Кваснищкая Ю. Г., Мьяльница Г. Ф., Михнян Е. В., Нейма А. В. Применения керамических фильтров при выплавке заготовок из жаропрочных сплавов // Процессы литья. – 2013. – № 6. – С. 69 – 74.
8. Максютя І.І., Кваснищка Ю.Г., Михнян О.В., Нейма О.В. Застосування пінокерамічних фільтрів при отриманні деталей газотурбінних двигунів // Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективні технології, матеріали й обладнання в ливарному виробництві» присвяченої 85-річчю ПрАТ «НКМЗ» і 55-річчю ПАТ «ЕМСС», м. Краматорськ, 2019. – С. 142 –143.
9. Максютя И. И., Кваснищкая Ю. Г., Верховлюк А. М., Мьяльница Г. Ф. Повышение ресурсных возможностей газотурбинных установок путём оптимизации легирующего комплекса // Процессы литья. – 2016. – № 4. – С. 63 – 70.
10. Кваснищка Ю. Г., Тарасевич М. І., Максютя І. І., Токарева О. О., Михнян О. В., Мьяльница Г. П. Використання розрахункових методик при створенні нових легуючих комплексів жароміцних сплавів для деталей ГТД // Процессы литья. – 2019. – №2. – С. 79 – 87.
11. Шуляк В. С. Литье по газифицируемым моделям. – СПб.: НПО «Профессионал», 2007. – 408с.
12. 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
13. Specification Z88YF1-S2 for supplying remelting stocks of alloy CM-88Y. – Technical specifications of “ZORYA” – “MASHPROEKT” GTRPC- 2016.
14. Патент № 110529 Україна. МПК C22C 19/05. Жароміцний корозійностійкий сплав на нікелевій основі для лопаток газотурбінних двигунів / Кваснищка Ю.Г., Кляс О.В., Крещенко В.А., Мьяльница Г.П., Максютя І.І., Шинський О.Й. – № а201401359; заявл. 12.02.2014; опубл. 12.01.2016. – Бюл. № 1/2016.
15. Патент № 18889 Україна. МПК B22C 1/00. Суміш для виготовлення ливарних форм / Сімановський В.М., Кваснищка Ю.Г., Єфімова В.Г., Єфімов Г.В., Максютя І. І. – № u200606664; заявл. 15.06.2006; опубл. 15.11.2006. – Бюл. № 11/2006.
16. Патент № 90425 Україна. МПК B22C 1/18. Суміш для виготовлення пінокерамічних фільтрів / Кваснищка Ю.Г., Максютя І.І., Шинський О.Й.,

- Мяльница Г.П., Верховлюк А.М., Михнян О.В. – № u201315253; заявл. 26.12.2013; опубл. 26.05.2014. – Бюл. №10/2014.
17. 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.
 18. Шинский О. И., Максютя И. И., Квасницкая Ю. Г., Михнян Е. В., Нейма А. В. Получение сложно-профильных деталей комбинированным способом литья по выплавляемым и выжигаемым моделям // Литье и металлургия (г. Минск, Беларусь). – 2016. – №3. – С. 31–37.

References

1. Kablov E.N. *Litye lopatki gazoturbinnnykh dvigatelei (splavy, tehnologiya, pokrytiia)* (Cast blades of gas turbine engines (alloys, technology, coatings)), Moscow: MISIS, 2001, 632 p. [in Russian].
2. Kishkin S.T. *Sozдание, issledovanie i primeneniye zharoprochnykh splavov: izbrannye trudy (k 100-letiyu so dnja rozhdeniya)* (Creation, research and application of heat-resistant alloys: Selected Works (to the 100th anniversary of birth)), Moscow: Nauka, 2001, 407 p. [in Russian].
3. Sims Ch.T., Stoloff N.S., Hagel U.K. *Supersplavy II: Zharoprochnye materialy dlia aerokosmicheskikh i promyshlennykh energoustanovok* (Superalloys II: high-temperature materials for aerospace and industrial power plants), Shalin R.E. (Ed.). (Vol. 1), Moscow: Metallurgiya, 1995, 384 p. [in Russian].
4. Repiakh S.I. *Tekhnologicheskie osnovy litia po vyplavljaemym modeliam* (Technological basics of investment casting), Dnepropetrovsk: Lira, 2006, 1056 p. [in Russian].
5. Maksyuta I.I., Kvasnitskaia Ju.H., Verhovliuk A.M., Mikhnian E.V., Levchenko Yu.N. *Metall i lit'e Ukrainy*, 2017, No. 8-10, pp. 31-37 [in Russian].
6. Suvorov S.A., Tebuev N.B. *Ogneupory*, 1992, No. 6, pp. 11-13 [in Russian].
7. Maksyuta I.I., Kvasnitskaia Ju.H., Mialnitsa H.F., Mikhnian E.V., Neima A.V. *Processy lit'ja*, 2013, No. 6, pp. 69-74 [in Russian].
8. Kvasnytska Yu.H., Maksyuta I.I., Mykhnian O.V., Neima O.V. *VII Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia «Perspektyvni tekhnologii, materialy y obladnannia v lyvarnomu vyrobnytstvi»* (VII International Scientific and Technical Conference «Promising Technologies, Materials and Equipment in Foundry»). Abstract of Papers, Kramatorsk, 2019, pp. 142-143 [in Ukrainian].
9. Maksyuta I.I., Kvasnitskaia Ju.H., Verhovljuk A.M., Mialnitsa H.F. *Processy lit'ja*, 2016, No. 4, pp. 46-51 [in Russian].
10. Kvasnytska Yu.H., Tarasevych M.I., Maksyuta I.I., Tokarieva O.O., Mykhnian O.V., Mialnitsa H.P. *Processy lit'ja*, 2019, No. 2, pp. 79-87 [in Ukrainian].
11. Shuljak V.S. *Lit'e po gazificiruemym modeljam* (Lost foam casting), St. Petersburg: NPO Professional, 2007, 408p. [in Russian].
12. Shinskij O.I., Maksyuta I.I., Neima A.V. *Metall i lit'e Ukrainy*, 2013, No. 9, pp. 14-18 [in Russian].
13. Specification Z88YF1-S2 for supplying remelting stocks of alloy CM-88Y. – Technical specifications of “ZORYA” – “MASHPROEKT” GTRPC, 2016 [in English].
14. Patent No. 110529 Ukraine, MPK C22C 19/05. *Zharomitsnyi koroziinostiikiyi splav na nikelivii osnovi dlia lopatok hazoturbinnnykh dvyhuniv* [Heat-resistant nickel-based corrosion-resistant alloy for blades of gas turbine engines].

- Kvasnytska Yu.H., Klias O.V., Kreshchenko V.A., Mialnitsa H.P., Maksuta I.I., Shynskiy O.I., no. a201401359; zayavl. 12.02.2014; opubl. 12.01.2016, Bul. no. 1 [in Ukrainian].
15. Patent No. 18889 Ukraine, MPK B22C1/00. *Sumish dlia vyhotovlennia lyvarnykh form* [A mixture for the manufacture of foundry molds]. Simanovskiy V.M., Kvasnytska Yu.H., Yefimova V.H., Yefimov H.V. Maksuta I.I., no. u 200606664; zayavl. 15.06.2006; opubl. 15.11.2006, Bul. no. 11, [in Ukrainian].
 16. Patent No. 90425 Ukraine, MPK B22C1/18. *Sumish dlia vyhotovlennia pinokeramichnykh filtriv* [Mixture for making foam ceramic filters]. Kvasnytska Yu.H., Maksuta I.I., Shynskiy O.I., Mialnitsa H.P., Verkhovliuk A.M., Mykhnian O.V., no. u 201315253 zayavl. 26.12.2013; opubl. 26.05.2014, Bul. no. 10, [in Ukrainian].
 17. Maksuta I.I., Kvasnitskaia Ju.H., Neima A.V., Mikhnian E.V., Tihonova O.A. *Processy lit'ja*, 2015, No. 3, pp. 47-56 [in Russian].
 18. Shinskij O.I., Maksuta I.I., Kvasnitskaia Yu.H., Mikhnian E.V., Neima A.V. *Lit'e i metallurgija*, 2016, No. 3, pp. 31-37 [in Russian].

Одержано 26.02.20

**O. I. Shynskiy, Yu. H. Kvasnytska, I. I. Maksuta, O. V. Neima,
O. V. Mykhnian**

Refining melts of heat-resistant alloys during casting of GTE details in shell forms obtained by foamed polystyrene models

Summary

Minimization of the melt contamination of heat-resistant alloys from excess gas content, non-metallic inclusions during crystallization upon receipt of the GTE details conducted by the authors empirical choice an of thermal conditions and technical parameters of foam ceramic filters (porosity, thickness, pore diameter) during in-molding. The use of more chemically and thermally stable refractory cast ceramics (filters, molds, crucibles), developed with the participation of the authors, also prevents contamination of the melt with impurity elements. Thus, the total volume content, %, of non-metallic inclusions decreased by 1.3 – 1.6 times, the mass fraction of gases, (oxygen, hydrogen, nitrogen) %, in castings, decreased by 1.5 – 2.0 times for both types of alloys.

Tested by the authors in the manufacture of molds replacement of the lost wax casting method on the burned expanded polystyrene models, allows to prevent the possible deformation of low-melting wax-containing model for sufficiently large parts and to reduce part defects in dimensional accuracy and improve surface cleanliness.

In general, the authors proposed the integrated use of in-house filtration refining of melts when casting in shell molds, made by combined technology using polystyrene foam and wax-containing models, this made it possible to obtain complex profile parts with a high range of performance characteristics by optimizing structural components when refining the melt from non-metallic inclusions and gases. Thus, the tensile strength at the test temperature of 900 °C and elongation increased from 650 to 690 MPa and from 9 to 14 %, respectively, for CM104 – VI + (Ta + Re) alloy, and from 750 to 780 MPa and from 15 to 19 %, respectively, for the alloy CM88Y + (Ta + Re).

Keywords: superalloys, refining, foam-ceramic filter, expanded polystyrene models, shell forms, combined casting method.