

УДК 620.18.620.17:669.245.781.296

Канд. тех. наук О. О. Педаш¹, канд. тех. наук Г. А. Бялік²,
д-р техн. наук Е. І. Цивірко²

¹АТ «Мотор Січ», ²Запорізький національний технічний університет; м. Запоріжжя

ПІДВИЩЕННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ КЕРАМІЧНОЇ ЛИВАРНОЇ ФОРМИ АЛЮМІНАТОМ КОБАЛЬТУ

Досліджено вплив поверхневого модифікування алюмінатом кобальту ($CoAl_2O_4$) на структуру та властивості жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗЛС-В, залитого в ливарну форму з різних температур. Встановлено, що більш ефективно подрібнення структури та підвищення властивостей забезпечувалися при заливанні розплаву з температур 1500...1550 °С. Показано, що подрібнення структури сплаву при використанні алюмінату кобальту відбувається за механізмом застосування мікрохолодильників.

Ключові слова: жароміцний нікелевий сплав, модифікування, алюмінат кобальту, структура.

Вступ

Раніше було показано [1], що застосування алюмінату кобальту ($CoAl_2O_4$) як поверхневого модифікатора для жароміцного сплаву ЖС6У покращило макро- й мікроструктуру виливків, їх тривалу міцність на 30...40%. При цьому зазначалося [1], що на позитивний вплив алюмінату кобальту помітно вплинули його кількість на робочій поверхні ливарної форми й гранулометричний склад, швидкість заповнення ливарної форми розплавом, тривалість витримки залитої форми у робочому вакуумі плавильної печі.

Випробування [2] у промислових умовах алюмінату кобальту, нанесеного на робочу поверхню керамічних електрокорундових форм, для отримання авіаційного литва з нікелевих жароміцних сплавів у цілому підтвердило покращення структури й властивостей металу. В той же час спостерігалися окремі випадки відсутності впливу алюмінату кобальту, що викликало необхідність провести додаткові випробування по впливу алюмінату кобальту при зміні окремих технологічних факторів, зокрема температури розплаву, що заливається у ливарну форму.

Мета роботи – вивчити вплив температури заливання сплавом ЖСЗЛС-ВІ керамічних форм з алюмінатом кобальту на структуру та властивості металу.

Методика проведення досліджень

Алюмінат кобальту виготовляли високотемпературним спіканням (1250 °С, 5 год, піч ППГ-3) добре перемішаних порошоків окису кобальту (40%, мас.) та електрокорунду М10 (60%, мас.). Синтезована композиція темно-синього кольору подрібнювалася для отримання порошку з питомою поверхнею 5500 см²/г. Для нанесення на модельний блок виготовлялася на водному

кремнезольному зв'язувальному суспензії (співвідношення рідкої та твердої фази було 1:4), куди засипали по черзі порошки (% мас.) алюмінату кобальту (5...6%); електрокорунду М5 (25%); М60 (30%); М40 (45%). Суміш перемішувалася протягом 24 годин для отримання робочої в'язкості 70...75 с за ОСТ1.51896-82 (віскозиметр ВЗ-4). Отримані керамічні форми проходили термічну обробку в прохідній газовій печі при температурі 950...1000 °С протягом 8 годин.

Шихтову заготовку жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗЛС-ВІ вагою 8 кг розплавляли на установці УППФ-3М та при залишковому тиску в печі 0,665 Па заливали у підігріті до 950±10 °С керамічні форми розплавом при температурах 1500±10 °С, 1550±10 °С, 1600±10 °С, 1650±10 °С.

З робочої поверхні форм з алюмінатом кобальту (після зміцнення при температурі 1050 °С та вибивання виливків) гостро заточеною титановою скребачкою зіскоблювали не менш 0,1 г робочого шару кераміки та розміщували на підкладку з фторопласту. Магнітним щупом (гостро заточений полюсний кінцевик та постійний магніт) видаляли дрібні металеві часточки з отриманих порошоків. Фрагменти керамічних форм вивчали під мікроскопом МБС-10, а характерні ділянки досліджували за фотографіями.

Зразки сплаву ЖСЗЛС-ВІ проходили термічну обробку (нагрівання 1190±10 °С, витримка 4 години, охолодження – на повітрі), випробовувалися на установці Р-5 (тимчасовий опір при кімнатній температурі) та ДСТ-500 (тривала міцність зразків з діаметром робочої зони 5 мм при температурі 950 °С та напруженні 120 МПа).

Макроструктуру вивчали на ударних зразках та макротемплетях після хімічного травлення

(реактив складу 80% HCl та 20% H_2O_2) за допомогою мікроскопу МБС-9.

Дендритну структуру вивчали на литих зразках металографічним методом на мікроскопі МІМ-8 при збільшеннях до $\times 500$. Форму та розміри макрозерна досліджували на бінокулярному мікроскопі МБС-9 при збільшенні $\times 4$.

Мікроструктуру сплаву вивчали методами якісної та кількісної (метод «Л» и «П» ГОСТ 1778-70) металографії на нетравлених та після електролітичного травлення (реактив Р18: 10 г лимонної кислоти, 10 г сірчанокислового амонію та 1200 мл води) шліфах.

Результати досліджень та їх обговорення

Хімічний склад сплаву ЖСЗЛС-ВІ всіх дослідних варіантів (% мас): (0,7–0,8)C; (15,6–16,3)Cr; (4,6–4,7)Co; (4,40–4,46)Mo; (4,06–4,15)W; (2,48–2,60)Al; (2,40–2,46)Ti відповідав вимогам ОСТ1.90127-85.

Металографічні дослідження робочого шару ливарної форми з алюмінатом кобальту показали, що після зміцнення при температурі 1050 °C на голубому поверхневому фоні спостерігалися розгалуджені ділянки з темнуватим відтінком (рис. 1, а). Зіскоблений порошок був світлого кольору з характерним блиском, а окремі ділянки мали світлокоричневий відтінок (рис. 1, б).

На робочій поверхні ливарної форми після контакту з розплавом, що був залитий при температурі 1550 °C, спостерігалися відносно крупні включення темного кольору (рис. 1, б). Зіскоблений порошок складався в основному з часток світлокоричневого та жовтого кольору з вкрапленнями часток голубого кольору (рис. 1, з).

Магнітним шупом з порошку, що був зіскоблений з робочої поверхні форми після зміцнення її при 1050 °C магнітних часток не виявили

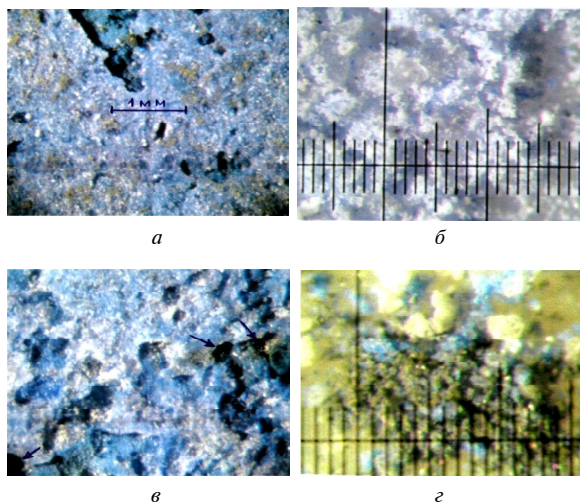


Рис. 1. Структура поверхні (а, б) та зіскобленого порошку (в, з) ливарної форми з алюмінатом кобальту після зміцнення при температурі 1050 °C (а, в) та взаємодії розплаву ЖСЗЛС-ВІ при 1550 °C (б, з), $\times 15$

(рис. 2, а). Після контакту форми з розплавом, що був залитий при температурі 1550 °C, з зіскобленого порошку магнітним шупом видали велику кількість магнітних часток темного кольору та менше – крупних часток ярко жовтого кольору (рис. 2, б), котрі ідентифікували як краплі затверділого кобальту [3]. В порошках з робочої поверхні форми, що були залиті металом з температурами 1600 °C та 1650 °C, магнітних часток не виявили.

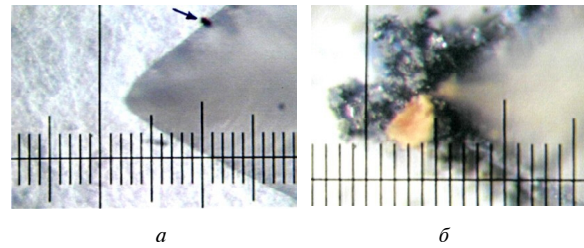


Рис. 2. Магнітний шуп після видалення із зіскобленого порошку: а – зміцнення керамічної форми при температурі 1050 °C; б – після контакту з розплавом при 1550 °C

При дослідженні макроструктури ударних зразків ($\square 10$ мм) було встановлено, що серед варіантів, що розглядаються, мінімальний розмір макрозерна був при заливанні сплаву з 1500 °C (рис. 3, а, табл. 1). З ростом температури заливання сплаву, особливо з 1600 °C й вище, помітно збільшувався розмір макрозерна (рис. 3, в, з, табл. 1).

Дослідження дендритної мікроструктури сплаву на поверхні та в центрі зразку показало, що величина дендритної комірки, яка утворена осями дендритів другого порядку, збільшувалась з ростом температури розплаву та від периферії до центру зразка (табл. 1).

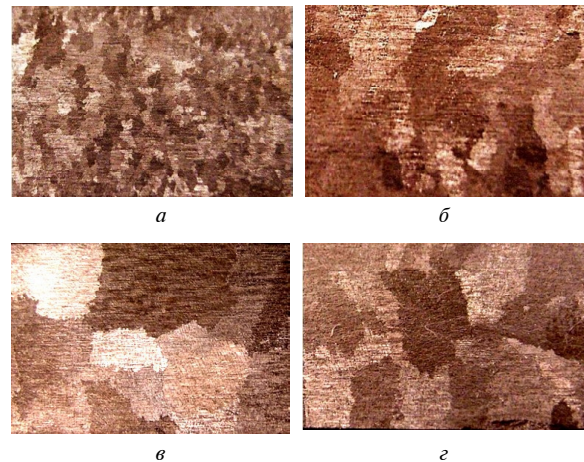


Рис. 3. Макроструктура ударних зразків сплаву ЖСЗЛС-ВІ з поверхневим модифікуванням, $\times 4$: а – 1500 °C; б – 1550 °C; в – 1600 °C; з – 1650 °C

Таблиця 1 – Параметри макро- й мікроструктури та властивості зразків (□ 10 мм) зі сплаву ЖСЗЛС-ВІ з поверхневим модифікуванням алюмінатом кобальту

Температура заливання, °С	Величина макрозерна, мм	Відстань між осями дендритів другого порядку (периферія/центр), мкм	Карбід		Карбонітриди		Механічні властивості (середні) при 20°С				Середній час до руйнування при T = 950°С й Σ = 120 МПа, τ _р , год
			I × 10 ⁻⁴	\bar{d} , мкм	%об. × 10 ⁻⁵	\bar{d} , мкм	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ, %	ψ, %	КСУ, Дж/см ²	
1500	0,53	20,0/45,0	436,8	5,25	3026	2,66	900	14,0	22,1	59,0	119
1550	0,99	30,0/57,5	435,2	5,55	3495	2,54	867	13,0	22,8	50,0	134
1600	1,75	57,5/75,0	439,6	5,97	3014	4,76	867	15,0	18,8	42,5	107
1650	1,64	65,0/65,0	348,8	6,58	7159	5,79	843	12,0	18,2	54,0	91

При заливанні розплаву з температури 1650 °С розмір дендритної комірки на периферії та в центрі зразка був однаковим (табл. 1), що говорить про перевагу об'ємної кристалізації з утворенням рівноосних мікрозерен. З підвищенням температури розплаву, що заливається в форму, відбувалося збільшення ширини меж мікрозерен (рис. 4, а, б) та розмірів мікропор (рис. 4, в, г).

В мікроструктурі термообробленого сплаву ЖСЗЛС-ВІ були присутні карбіди та карбонітриди, що розташовувалися по межах та в середині мікрозерен (рис. 4). З підвищенням температури розплаву середні розміри карбідів збільшувалися, а їх кількість (індекс забрудненості І) зменшувалась (табл. 1). В той же час збільшувалися розміри та вміст (об'ємний %) карбонітридів (табл. 1).

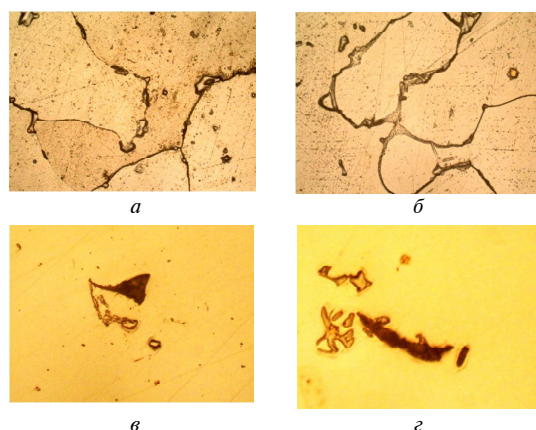


Рис. 4. Мікроструктура сплаву ЖСЗЛС-ВІ після поверхневого модифікування (а, б), усадкові пори (в, г), ×100: а, в – 1500 °С; б, г – 1600 °С

Вивчення розподілення карбідів та карбонітридів за розмірними групами показало, що з підвищенням температури розплаву, що заливається у форму, в структурі помітно зменшилася кількість карбідів, але підвищилася доля карбідів більших розмірів (рис. 5, а). Так при температурі розплаву 1650 °С приблизно 50% карбідів мали розміри 5,1...20,0 мкм.

Порівняно з карбідами в структурі сплаву карбонітриди зустрічалися рідше. З підвищенням температури розплаву, що заливається у форму, кількість карбонітридів збільшувалась (рис. 5, б) та росла частка включень більших розмірів.

Механічні випробування металу дослідних варіантів, а також випробування на тривалу міцність показали, що кращі показники міцності та пластичності, а також тривала міцність були отримані при температурі розплаву 1500...1550 °С.

Отримані дані по впливу алюмінату кобальту на структуру та механічні властивості сплаву ЖСЗЛС-ВІ, що був залитий у ливарні форми в температурному інтервалі 1500...1650 °С, показали, що при температурах 1500, 1550 °С алюмінат

кобальту спрацював на покращення показників структури й властивостей металу, а при температурах 1600, 1650 °С його вплив був відсутнім.

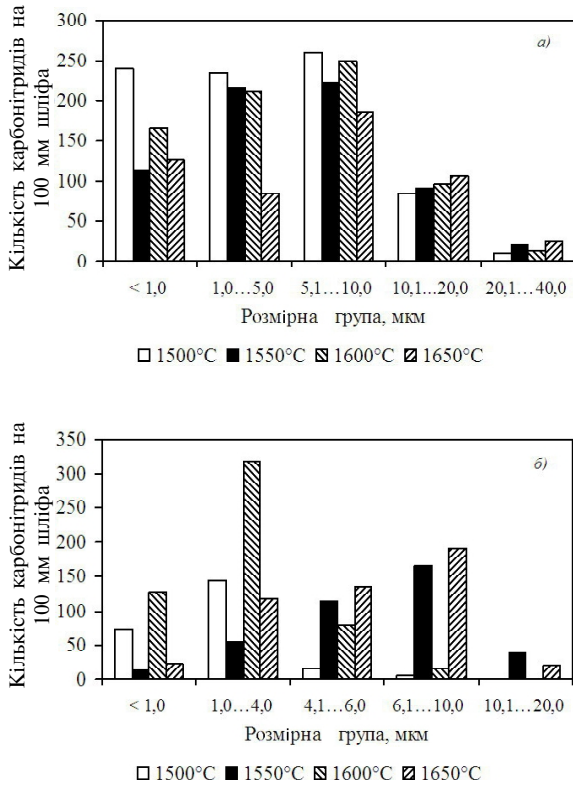


Рис. 5. Кількість та розподілення за розмірними групами карбідів (а) й карбонітридів (б) в сплаві ЖСЗЛС-ВІ при температурі заливання 1500 °С, 1550 °С, 1600 °С, 1650 °С

Вимірюваннями встановлено, що товщина першого робочого шару ливарної форми, яка складалася з суспензії з алюмінатом кобальту й обсипання із порошку електрокорунду, не перевищувала 1,5 мм. Цей шар у нагрій до температури 950 °С формі при контакті з розплавом за короткий проміжок часу може прогрітися до температур рідкого металу. Раніше було встановлено [1, рис. 5.1], що поверхня ливарної форми з алюмінатом кобальту порівняно з електрокорундовою набагато краще змочується рідким металом. З підвищенням часу контакту рідкого металу до 10 хв. крайовий кут змочування знижується с 135° до 95° [1, рис. 5.2], що сприяє більш активному проходженню дифузійно-капілярним процесам взаємодії між складовими форми й металу.

Параметри кристалічної ґратки нікелю ($a = 35,24$ нм) та алюмінату кобальту ($a = 81,08$ нм) суттєво відрізняються, тому частинки алюмінату кобальту не можуть слугувати готовими центрами кристалізації для нікелевого сплаву, виходячи із принципу розмірної й структурної відповідності.

До складу жароміцного нікелевого сплаву входять титан й алюміній, котрі в умовах високих температур й вакууму порівняно з кобальтом мають значно більшу термодинамічну активність до кисню, що призводить до відновлення оксиду кобальту (CoO) у складі алюмінату кобальту до металевого кобальту (температура плавлення кобальту 1495°C). Частинки металевого кобальту розмірами до 15 мкм, що відновлений з його окису, були виявлені при нагріванні алюмінату кобальту при 1400 °С [3] й більш дрібні після витримки при температурі 1200 °С [4].

Коефіцієнти теплопровідності (λ , Вт/(м·К)) нікелевого сплаву ЖСЗЛС-ВІ, кобальту й електрокорунду мають величини 60,75 [5], 70,9 й 25,2 відповідно. Тому присутність часток металевого кобальту в поверхневому шарі ливарної форми помітно збільшує відбирання тепла від виливка, переохолоджує розплав, сприяє швидкості утворення центрів кристалізації та подрібнює структуру сплаву, що й спостерігали при заливанні сплаву з температури 1500 °С й 1550 °С.

При температурі розплаву від 1600 °С й вище час контакту рідкого металу з поверхнею форми збільшується, частинки кобальту перегріваються, рідкотекучість їх росте та в результаті капілярних процесів відбувається поглинання рідких краплин кобальту розплавом. Теплопровідність робочого шару форми зменшилася, відбулося укрупнення макроструктури й погіршення властивостей сплаву (табл. 1).

Отже, відновлені з окису кобальту частки металевого кобальту проявили себе як мікрохолодильники, що викликають підвищення теплової акумуляції робочого шару форми й сприяють подрібненню структури металу. Розчинення рідких крапель кобальту в розплаві призвело до того, що алюмінат кобальту при температурі 1600 °С й вище не вплинув на структуру виливка.

Висновки

1. Введення алюмінату кобальту у робочий шар керамічної форми призводить до подрібнення структури виливків за механізмом застосування мікрохолодильників.

2. При заливанні розплаву з температури 1500...1550 °С у робочій поверхні ливарної форми окис кобальту відновлюється до металевого кобальту, котрий має майже в три рази більшу теплопровідність порівняно з електрокорундом. Активне тепловідведення від розплаву сприяє переохолодженню металу виливка, подрібненню структури й покращенню властивостей сплаву.

3. Ливарні форми з алюмінатом кобальту для отримання виливків зі сплаву ЖСЗЛС-ВІ з задовольняючими якісними фізико-механічними властивостями необхідно заливати розплавом з температурою не вище 1550 °С.

Список літератури

1. Каблов Е. Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия) / Каблов Е. Н. – М. : МИСИС, 2001. – 632 с.
2. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки турбины. Часть II. [Богуслаев В. А., Муравченко Ф. М., Жеманюк П. Д. и др.]. – Запорожье : ОАО «Мотор Сич», 2007. – 496 с.
3. Чапская А. Ю. Получение керамических пигментов на основе шпинелей методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза : автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук : спец. 05.17.11 – «Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов» – Томск, 2007. – 23 с.
4. J.A. bustnes, N.N. Viswanathan, Du sichen, and S. Seetharaman Investigation on Reduction of CoAl_2O_4 by Hydrogen gas using TGA. – Metallurgical and materials transactions. Volume 31B, June 2000. – P. 540–542.
5. Педаш О. О. Вплив способів модифікування на структуру та властивості жароміцних нікелевих сплавів : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.01 / Педаш Олександрович. – Запоріжжя, 2011. – 173 с.

Поступила в редакцію

Педаш А.А., Бялик Г.А., Цивирко Э.И. Повышение теплопроводности керамической литейной формы алюминатом кобальта

Исследовано влияние поверхностного модифицирования алюминатом кобальта (CoAl_2O_4) на структуру и свойства жаропрочного никелевого сплава ЖСЗЛС-ВИ, залитого в литейную форму с разных температур. Установлено, что более эффективное измельчение структуры и повышение свойств обеспечивались при заливке расплава с температур 1500...1550 °С. Показано, что измельчение структуры сплава при использовании алюмината кобальта происходит по механизму применения микрохолодильников.

Ключевые слова: жаропрочный никелевый сплав, модифицирование, алюминат кобальта, структура.

Pedash A., Byalik G., Tzivirko E. Increasing of the ceramic casting mould thermal conductivity with cobalt aluminate

Influence of surface modification with cobalt aluminate on the structure and properties of the ЖСЗЛС heat resistant alloy poured into the mould at different temperatures was studied. It has been established that a more efficient structure refining and properties improvement were attained with the melt pouring temperature of 1500...1550 °C. It has been demonstrated that the structure refining of the alloy with the results from a microinoculator doping effect.

Key words: heat resistant nickel alloy, modification, cobalt aluminate, structure.