

УДК 620.18.620.17:669.245.781.296

А. А. ПЕДАШ¹, Г. А. БЯЛИК², Э. И. ЦИВИРКО²¹ АО «МОТОР СИЧ», Запорожье, Украина² Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

ПОВЫШЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ЛИТЕЙНОЙ КЕРАМИЧЕСКОЙ ФОРМЫ АЛЮМИНАТОМ КОБАЛЬТА

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

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

Введение

Ранее было показано [1], что применение алюмината кобальта ($CoAl_2O_4$) как поверхностного модификатора для жаропрочного сплава ЖСБУ улучшило макро- и микроструктуру отливок, их длительную прочность на 30...40%. При этом отмечалось [1], что на положительное влияние алюмината кобальта заметно влияло его количество на рабочей поверхности литейной формы и гранулометрический состав, скорость наполнения литейной формы расплавом, продолжительность выдержки залитой формы в рабочем вакууме плавильной печи.

Опробование [2] в промышленных условиях алюмината кобальта, нанесенного на рабочую поверхность керамических электрокорундовых форм, для получения авиационного литья из никелевых жаропрочных сплавов, в целом подтвердило улучшение структуры и свойств металла. В то же время наблюдались отдельные случаи отсутствия влияния алюмината кобальта, что вызвало необходимость провести дополнительные исследования по влиянию алюмината кобальта при изменении отдельных технологических факторов, в частности температуры заливаемого в литейную форму расплава.

Цель настоящей работы – изучить влияние температуры заливки сплавом ЖСЗЛС-ВИ керамических форм с алюминатом кобальта на структуру и свойства металла.

1. Экспериментальная часть

Алюминат кобальта изготавливали высокотемпературным спеканием (1250°C, 5 ч, печь ППГ-3) хорошо перемешанных порошков окиси кобальта (40% по

массе) и электрокорунда М10 (60% по массе). Синтезированная композиция темно-синего цвета измельчалась для получения порошка с удельной поверхностью 5500 см²/г. Для нанесения на модельный блок изготавливалась на водном кремнезольном связующем суспензия (соотношение жидкой и твердой фазы было 1:4), куда засыпали по очереди порошки (% по массе) алюмината кобальта (5...6%); электрокорунда М5 (25%); М60 (30%); М40 (45%). Смесь перемешивалась в течение 24 часов для получения рабочей вязкости 70...75 сек по ОСТ 1.51896-82 (вискозиметр ВЗ-4). Полученные керамические формы проходили термическую обработку в проходной газовой печи при температуре 950...1000°C в течение 8 часов.

Шихтовую заготовку жаропрочного никелевого сплава ЖСЗЛС-ВИ весом 8 кг расплавляли на установке УППФ-3М и при остаточном давлении в печи 0,665Па заливали, в подогретые до 950±10°C керамические формы, расплавом при температурах 1500±10°C, 1550±10°C, 1600±10°C, 1650±10°C.

С рабочей поверхности форм с алюминатом кобальта (после упрочнения при температуре 1050°C и выбивки отливок) острозаточенным титановым скребком соскабливали не менее 0,1 г рабочего слоя керамики и размещали на подкладку из фторопласта. Магнитным щупом (острозаточенный полюсный концевик и постоянный магнит) извлекали мелкие металлические частицы из полученных порошков. Фрагменты керамических форм изучали под микроскопом МБС-10, а характерные участки исследовали по фотографиям.

Образцы сплава ЖСЗЛС-ВИ проходили термическую обработку (Нагрев 1190±10°C, выдержка 4 часа, охлаждение - на воздухе), испытывались на установке Р-5 (временное сопротивление разрыву

при комнатной температуре) и ДСТ-500 (длительная прочность образцов с диаметром рабочей зоны 5 мм при температуре 950°C и напряжении 120МПа).

Макроструктуру изучали на ударных образцах и макротемплетах после химического травления (реактив состава 80%НCl и 20%Н₂O₂) с помощью микроскопа МБС-9.

Дендритную структуру изучали на литых образцах металлографическим методом на микроскопе МИМ-8 при увеличениях до ×500. Форму и размеры макрозерна исследовали на бинокулярном микроскопе МБС-9 при увеличении ×4.

Микроструктуру сплава изучали методами качественной и количественной (метод «Л» и «П» ГОСТ 1778-70) металлографии на нетравленных и после электролитического травления (реактив Р18: 10 г. лимонной кислоты, 10 г. сернокислого аммония и 1200 мл. воды) шлифах.

2. Анализ полученных результатов

Химический состав сплава ЖСЗЛС-ВИ всех опытных вариантов (% мас): (0,7-0,8)С; (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 соответствовал требованиям ОСТ 1.90127-85.

Металлографические исследования рабочего слоя литейной формы с алюминатом кобальта показали, что после упрочнения при температуре 1050°C на голубом поверхностном фоне наблюдались обширные участки с темноватым оттенком (рис. 1, а). Соскобленный порошок был светлого цвета с характерным блеском, а отдельные участки имели светлоржавный оттенок (рис. 1, в).

На рабочей поверхности литейной формы после контакта с расплавом, залитым при температуре 1550°C, наблюдались относительно крупные включения темного цвета (рис. 1, б). Соскобленный порошок состоял в основном из частиц светлоржавного и желтого цвета с вкраплениями частиц голубого цвета (рис. 1, г).

Магнитным щупом из порошка, соскобленного с рабочей поверхности формы после упрочнения ее при 1050°C магнитных частиц не обнаружили

(рис. 2, а). После контакта формы с расплавом, залитым при температуре 1550°C, из соскобленного порошка магнитным щупом извлекли большое количество магнитных частиц темного цвета и меньше – крупных частиц ярко желтого цвета (рис. 2, б), которые идентифицировались как капли затвердевшего кобальта [3]. В порошках из рабочей поверхности формы, залитых металлом с температурами 1600°C и 1650°C, магнитных частиц не обнаружили.

При исследовании макроструктуры ударных образцов (□ 10мм) было установлено, что среди рассматриваемых вариантов минимальный размер макрозерна был при заливке сплава с 1500°C (рис. 3, а, табл. 1). С ростом температуры заливки сплава, особенно с 1600°C и выше, заметно увеличивался размер макрозерна (рис. 3, в, г, табл. 1).

Изучение дендритной микроструктуры сплава на поверхности и в центре образца показало, что величина дендритной ячейки λ_D , образуемой осями дендритов второго порядка увеличивалась с ростом температуры расплава и от периферии к центру образца (табл. 1). При заливке расплава с температуры 1650°C размер дендритной ячейки на периферии и в центре образца был одинаковым (табл. 1), что говорит о преобладании объемной кристаллизации расплава с образованием равноосных микрозерен. С повышением температуры заливаемого в форму расплава происходило увеличение ширины границ микрозерен (рис. 4, а, б) и размеров микропор (рис. 4, в, г).

В микроструктуре термообработанного сплава ЖСЗЛС-ВИ присутствовали карбиды и карбонитриды, располагавшиеся по границам и внутри микрозерен (рис. 4). С повышением температуры заливаемого расплава средние размеры карбидов увеличивались, а их количество (индекс загрязненности I) уменьшалось (табл. 1). В то же время увеличивались размеры и содержание (объемный %) карбонитридов (табл. 1).

Изучение распределения карбидов и карбонитридов по размерным группам показало, что с повышением температуры заливаемого в форму расплава в структуре заметно уменьшилось количество карбидов, но повысилась доля карбидов больших размеров (рис. 5, а). Так при температуре расплава 1650°C примерно 50% карбидов имели размеры 5,1...20,0 мкм.

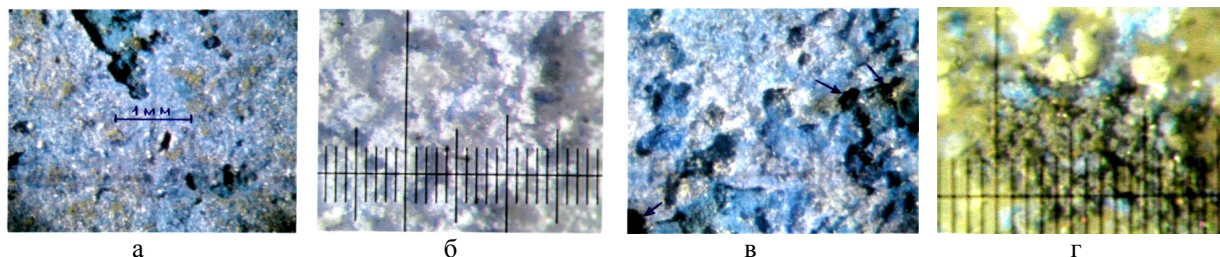


Рис. 1. Структура поверхности (а, б) и соскобленного порошка (в, г) литейной формы с алюминатом кобальта после упрочнения при температуре 1050°C (а, в) и взаимодействия расплава ЖСЗЛС-ВИ при 1550°C (б, г), ×15

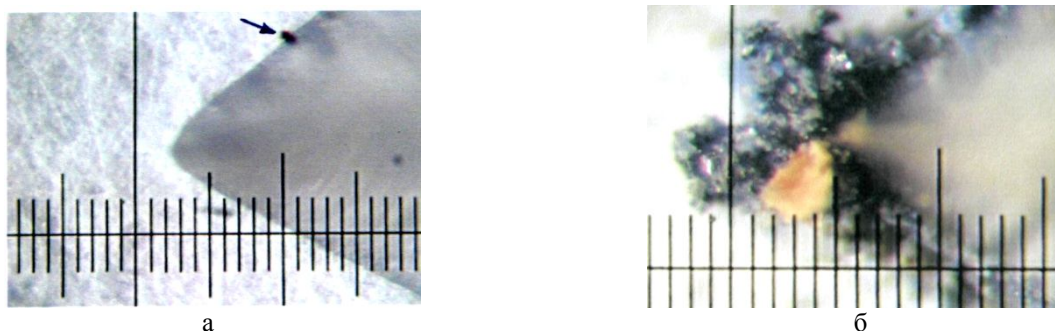


Рис. 2. Магнитный щуп после удаления из соскобленного порошка:

а - упрочнение керамической формы при температуре 1050°C; б - после контакта с расплавом при 1550°C

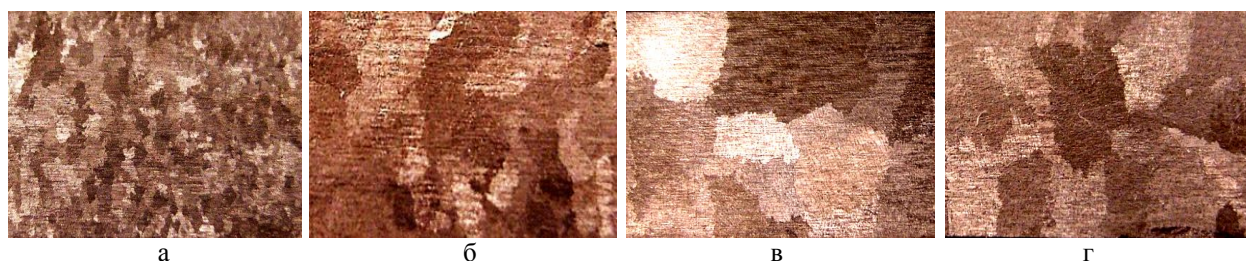
Рис. 3. Макроструктура ударных образцов сплава ЖСЗЛС-ВИ с поверхностным модифицированием, $\times 4$: а – 1500°C; б – 1550°C; в – 1600°C; г – 1650°C

Таблица 1

Параметры макро- и микроструктуры, свойства образцов (\square 10мм) из сплава ЖСЗЛС-ВИ с поверхностным модифицированием алюминатом кобальта

Т _{зал.} , °С	Величина макрозерна, мм	λ_{II} (периферия/центр), мкм	Карбиды		Карбонитриды		Механические свойства (средние) при 20°C				Среднее время до разрушения при Т=950°C, $\sigma=120$ МПа, τ_p , ч.
			$I \times 10^{-4}$	\bar{d} , мкм	%об. $\times 10^{-5}$	\bar{d} , мкм	$\sigma_{в}$, 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

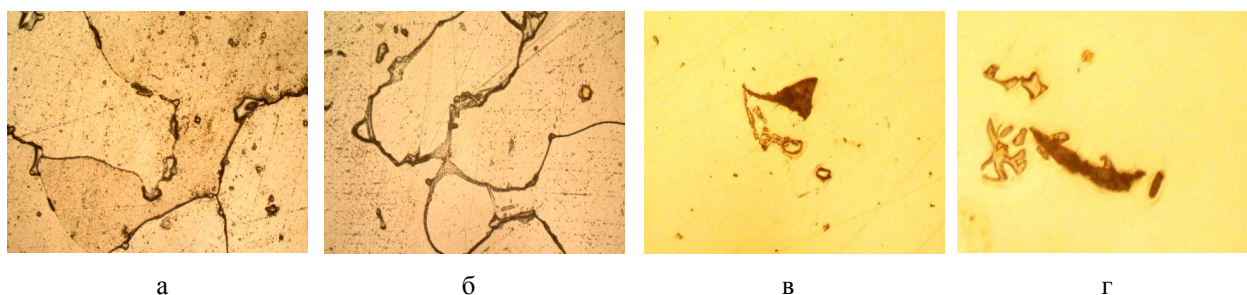


Рис. 4. Микроструктура сплава ЖСЗЛС-ВИ

после поверхностного модифицирования (а, б), усадочные поры (в, г), $\times 100$:

а, в – 1500°C; б, г – 1600°C

По сравнению с карбидами в структуре сплава карбонитриды встречались реже. С повышением температуры заливаемого в форму расплава количество карбонитридов увеличивалось (рис. 5, б) и росла доля включений большего размера.

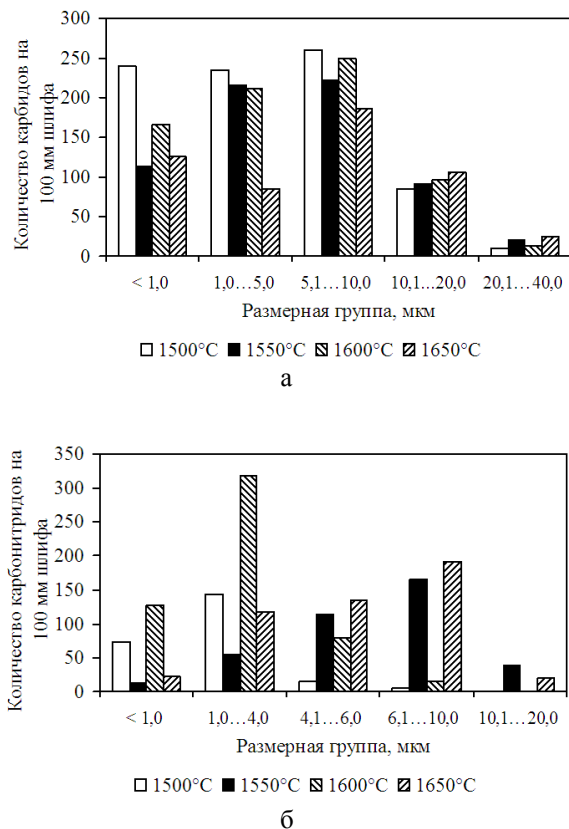


Рис. 5. Количество и распределение по размерным группам карбидов (а) и карбонитридов (б) в сплаве ЖСЗЛС-ВИ при температуре заливки: 1500°C, 1550°C, 1600°C, 1650°C

Механические испытания металла исследуемых вариантов, а также испытания на длительную прочность показали, что лучшие прочностные, пластические свойства и длительная прочность были получены при температуре расплава 1500...1550°C.

Полученные данные о влиянии алюмината кобальта на структуру и механические свойства сплава ЖСЗЛС-ВИ, залитого в литейные формы в температурном интервале 1500...1650°C показали, что при температурах 1500, 1550°C алюминат кобальта способствовал на улучшение показателей структуры и свойств сплава, а при температурах 1600, 1650°C его влияние отсутствовало.

Измерениями установлено, что толщина первого рабочего слоя литейной формы, состоящего из суспензии с алюминатом кобальта и обсыпки из порошка электрокорунда, не превышал 1,5 мм. Этот слой в нагретой до температуры 950°C форме при контакте с расплавом за короткий промежуток вре-

мени может прогреться до температур жидкого металла. Ранее было установлено [1, рис. 5.1], что поверхность литейной формы с алюминатом кобальта, по сравнению с электрокорундовой, намного лучше смачивается жидким металлом. С увеличением времени контакта жидкого металла до 10 мин краевой угол смачивания снижается с 135° до 95° [1, рис. 5.2], что способствует более активному прохождению диффузионно-капиллярных процессов взаимодействия между составляющими формы и расплава.

Параметры кристаллической решетки никеля ($a=35,24$ нм) и алюмината кобальта ($a=81,08$ нм) существенно отличаются, поэтому частицы алюмината кобальта не могут быть готовыми центрами кристаллизации для никелевого сплава, исходя из принципа размерного и структурного соответствия.

В состав жаропрочного никелевого сплава входят титан и алюминий, которые в условиях высоких температур и вакуума, по сравнению с кобальтом, имеют значительно большую термодинамическую активность к кислороду, что приводит к восстановлению оксида кобальта (CoO) в составе алюмината кобальта до металлического кобальта (температура плавления кобальта - 1495°C). Частицы металлического кобальта размерами до 15 мкм, восстановленного из его оксида, были выявлены при нагреве алюмината кобальта при 1400°C [3], а более мелкие – после выдержки при температуре 1200°C [4].

Коэффициенты теплопроводности (λ , Вт/(м·К)) никелевого сплава ЖСЗЛС-ВИ, кобальта и электрокорунда имеют величины 60,75 [5], 70,9 и 25,2 соответственно. Поэтому, присутствие частиц металлического кобальта в поверхностном слое литейной формы заметно увеличивает отбор тепла от отливки, переохлаждает расплав, способствует скорости образования центров кристаллизации и измельчает структуру сплава, что и наблюдали при заливке сплава с температуры 1500°C и 1550°C.

При температуре расплава от 1600°C и выше время контакта жидкого металла с поверхностью формы увеличивается, частицы кобальта перегреваются, жидкотекучесть их растет и в результате капиллярных процессов происходит поглощение жидких капель кобальта расплавом. Теплопроводность рабочего слоя формы снизилась, макроструктура укрупнилась и ухудшились свойства сплава (см. табл. 1).

Следовательно, восстановленные из окиси кобальта частицы металлического кобальта проявили себя как микрохолодильники, повышающие тепловую аккумуляцию рабочего слоя формы и способствующие измельчению структуры металла. Растворение жидких капель кобальта в расплаве привело к

тому, что алюминат кобальта при температуре 1600°C и выше не влиял на структуру отливки.

Заключение

1. Введение алюмината кобальта в рабочий слой керамической формы приводит к измельчению структуры отливок по механизму применения микрохолодильников.

2. При заливке расплава с температуры 1500...1550°C в рабочей поверхности литейной формы окись кобальта восстанавливается до металлического кобальта, который имеет почти в три раза большую теплопроводность по сравнению с электрокорундом. Активный теплоотвод от расплава способствует переохлаждению металла отливки, измельчению структуры и улучшению свойств сплава.

3. Литейные формы с алюминатом кобальта для получения отливок из сплава ЖСЗЛС-ВИ с удовлетворительными качественными физико-механическими свойствами необходимо заливать расплавом с температурой не выше 1550°C.

Поступила в редакцию 2.06.2015, рассмотрена на редколлегии 23.06.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В. В. Шаломеев, Запорожский национальный технический университет, Запорожье.

ПІДВИЩЕННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ КЕРАМІЧНОЇ ЛИВАРНОЇ ФОРМИ АЛЮМІНАТОМ КОБАЛЬТУ

О. О. Педаш, Г. А. Бялик, Е. І. Цивірко

Досліджено вплив поверхневого модифікування алюмініатом кобальту (CoAl_2O_4) на структуру та властивості жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗЛС-ВІ, що був залитий в керамічну ливарну форму з різних температур. Встановлено, що більш ефективно подрібнення структури та підвищення механічних властивостей й жароміцності забезпечувалося при заливанні жароміцного розплаву з температур 1500...1550°C. На основі теоретичного аналізу показано, що подрібнення структури сплаву при використанні алюмініату кобальту відбувається за механізмом застосування мікрохолодильників.

Ключові слова: жароміцний нікелевий сплав, модифікування, алюмініат кобальту, структура, жароміцність, температура заливання.

INCREASING OF THE CERAMIC CASTING MOULD THERMAL CONDUCTIVITY WITH COBALT ALUMINATE

A. A. Pedash, G. A. Byalik, E. I. Tzivirko

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, heat resistance, melt pouring temperature.

Педаш Алексей Александрович – канд. техн. наук, нач. бюро управления главного металлурга АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.

Бялик Гарри Абрамович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Машины и технология литейного производства», Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина.

Цивирко Эдуард Иванович – д-р техн. наук, проф. каф. «Машины и технология литейного производства», Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина.

Литература

1. Каблов, Е. Н. Литье лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия). [Текст] / Е. Н. Каблов. – М. : МИСИС, 2001. – 632 с.
2. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки турбины. Ч. 2. [Текст] / В. А. Богуслав, Ф. М. Муравченко, П. Д. Жеманюк [и др]. – Запорожье : ОАО «Мотор-Сич», 2007. – 496 с.
3. Чапская, А. Ю. Получение керамических пигментов на основе шпинелей методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.17.11 / Чапская Анастасия Юрьевна, ТПУ – Т., 2007. – 23 с.
4. Bustnes, J. A. Investigation on reduction of CoAl_2O_4 by Hydrogen gas using TGA [Text] / J. A. Bustnes, N. N. Viswanatan, Du Sichen // Metallurgical and materials transactions. – 2000. – Vol. 1. – P. 540-542.
5. Педаш, А. А. Влияние способов модифицирования на структуру и свойства жаропрочных никелевых сплавов [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.01 ; защищена 27.05.2011 ; утв. 11.11.2011 / Педаш Алексей Александрович. – Запорожье, 2011. – 173 с.