

УДК 669.014.018.44

А. А. Педаш¹, А. Г. Коломойцев², д-р техн. наук Э. И. Цивирко³¹ АО «Мотор Сич», ² ЗМЗ им. Омельченко,
³ Запорожский национальный технический университет,
г. ЗапорожьеСТЕРЖНИ С АЛЮМИНАТОМ КОБАЛЬТА ДЛЯ
ОТВЕТСТВЕННОГО ЛИТЬЯ ГТД

Проведено опытно-промышленное опробование стержней, изготовленных с применением алюмината кобальта, для поверхностного модифицирования охлаждаемых литых лопаток газотурбинных двигателей из никелевого жаропрочного сплава ЖС6У. При этом модификатор наносился в виде суспензии на керамический стержень или вводился непосредственно в стержневую смесь. Установлено, что стержни, изготовленные из смеси с 5% (об.) алюмината кобальта, обеспечивали более однородную и плотную структуру внутренних поверхностей охлаждаемых отливок.

Ключевые слова: керамический стержень, алюминат кобальта, поверхностное модифицирование, жаропрочный сплав.

Повышенная трещиностойчивость и эксплуатационная долговечность деталей горячего тракта газотурбинных двигателей (ГТД) обеспечивается мелкозернистой структурой как на внешних, так и на внутренних поверхностях охлаждаемых (с наличием внутренней полости) литых деталей. Эффективным способом измельчения структурных составляющих отливок показало поверхностное модифицирование алюминатом кобальта. В этом случае модификатор наносится на керамический стержень [1, 2] в составе суспензий с различными компонентами [3, 4], в которых содержание этого модификатора составляет 5–12%.

В тоже время, дополнительное использование суспензий усложняет технологический процесс, увеличивает его трудоемкость и материальные затраты вследствие применения большого количества компонентов в их составе и обилия технологических операций приготовления (нанесение, сушка, термическое упрочнение и т. д.). Указанные недостатки возможно устранить путем введения алюмината кобальта непосредственно в стержневую массу. При этом вопрос о количественном содержании модификатора в стержневой смеси остается открытым.

В данной работе изучали возможность применения стержней, изготовленных из стержневой массы с алюминатом кобальта, для получения охлаждаемых деталей ГТД.

Методом литья по выплавляемым моделям изготавливали сектора соплового аппарата (двигатель Д-18Т) из жаропрочного сплава ЖС6У-ВИ (% масс.): [(0,13÷0,20)C; (8,0÷9,5)Cr; (9,0÷10,5)Co; (2,0÷2,3)Ti; (5,1÷6,0)Al; (9,5÷11,0)W; (1,2÷2,4)Mo; (0,8÷1,2)Nb]. Внутренняя полость отливок была получена стержнями (рис. 1), изготовленными по следующим вариантам:

1. Стандартная стержневая смесь состава: электрокорунд белый марок 24А и 25А (ГОСТ 3647-80) – 75 %, кварц пылевидный искусственный (ГОСТ 9077-82) – 7 %, карбид кремния 64С (ГОСТ 23683-89) – 3 %, пластификатор ПП-10 – 15 %; 2. Стержни с нанесенной на поверхность суспензией [4]; 3. Стержневая смесь состава варианта 1 с дополнительным введением 5 % (об.) порошкообразного алюмината кобальта; 4. Стержневая смесь состава варианта 1 с дополнительным введением 10 % (об.) порошкообразного алюмината кобальта.

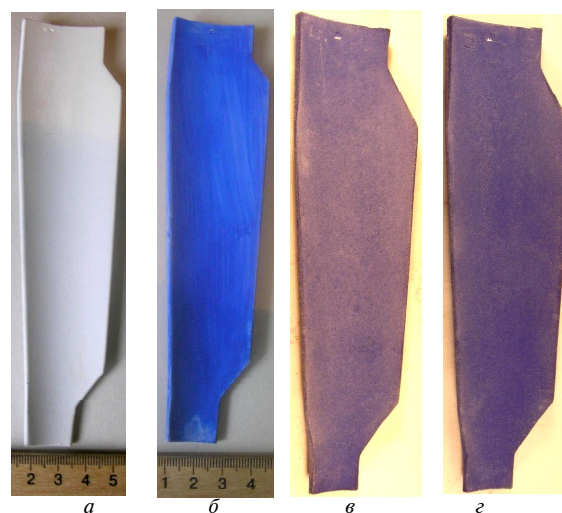


Рис. 1. Керамические стержни для изготовления лопаток в секторе соплового аппарата:
а – стандартная технология; б – покрытый суспензией с использованием этилцелозольва – 47,5 %, лак КО-815 – 47,5 %, $\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ – 5 %; в – с 5 % $\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$; з – 10 % $\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$

Стержневые смеси изготавливались по следующей технологии: компоненты смеси засыпали в смеситель, смешивали и подогревали в течение 3–3,5 часов до температуры 130 °С, затем вводили пластификатор и перемешивали до получения однородного состояния. После охлаждения до температуры 20 °С полученную массу измельчали на гранулы. Из гранул прессованием изготавливали стержни на гидравлическом прессе в специальных пресс-формах. После удаления стержней из пресс-формы их заформовывали в керамические короба с помощью порошкообразного глинозема. Термическую обработку (спекание) стержней всех вариантов проводили при 1250 °С, выдержка 6 часов, охлаждение с печью. Стержни извлекали из коробов, зачищали от глинозема, удаляли рубцы и зачищали шероховатости. Установлено, что прокатка стержней при 1250 °С приводила к восстановлению из алюмината кобальта металлического кобальта, расположенного в виде капель размером 5–8 мкм, что заметно повысит теплоотвод от твердеющей отливки и гарантированно обеспечит получение мелкозернистой структуры [5].

В литейную форму одного сектора соплового аппарата размещали стержни, изготовленные по четырем вариантам. Из отливок, полученных по действующей технологии, стержни удаляли гидротермическим выщелачиванием.

Химический состав лопаток секторов соплового аппарата исследуемых вариантов удовлетворял требованиям нормативно-технической документации.

Анализ макроструктуры лопаток, в которых использовалась стержневая смесь с 5 % и 10 %

алюмината кобальта, показал, что на наружной поверхности сформировалась однородная макроструктура с полиэдрическими зёрнами величиной 1–2,5 мм (рис. 2, в, г). Существенной разницы по величине, форме зёрен и их распределению по перу в зависимости от процентного содержания модификатора не наблюдалось. Следует отметить, что макроструктура отливок, изготовленных с применением стержневой смеси вариантов 3 и 4, была более равномерной по сравнению со структурой лопаток, в которых использовались стержни покрытые суспензией. Применение стержней с суспензией (вариант 2) показало, что в структуре металла рядом со столбчатыми зёрнами присутствовали и равноосные, размером от 0,1 мм до 2,0 мм (рис. 2, б). Величина макрозёрна в лопатках без модифицирования была 2–4 мм (рис. 2, а).

На лопатках, полученных с использованием стержневых смесей вариантов 3 и 4, вдоль выходной кромки наблюдалась зона узких столбчатых зёрен, вытянутых перпендикулярно кромке (рис. 2, в, г). Образование такой структуры, скорее всего, связано с более интенсивным теплоотводом. Ширина этой зоны на наружной поверхности составила 8–10 мм, а для немодифицированных лопаток 10–15 мм.

В поперечном сечении пера всех исследуемых лопаток макроструктура была мелкозернистая (рис. 3). Величина макрозёрна в лопатках, полученных с использованием стержневой смеси с алюминатом кобальта, составляла 0,5–1,0 мм, тогда как в лопатках с использованием стержней покрытых суспензией – 0,5–2,5 мм, а в лопатках, полученных со стандартными стержнями – 1–4 мм.

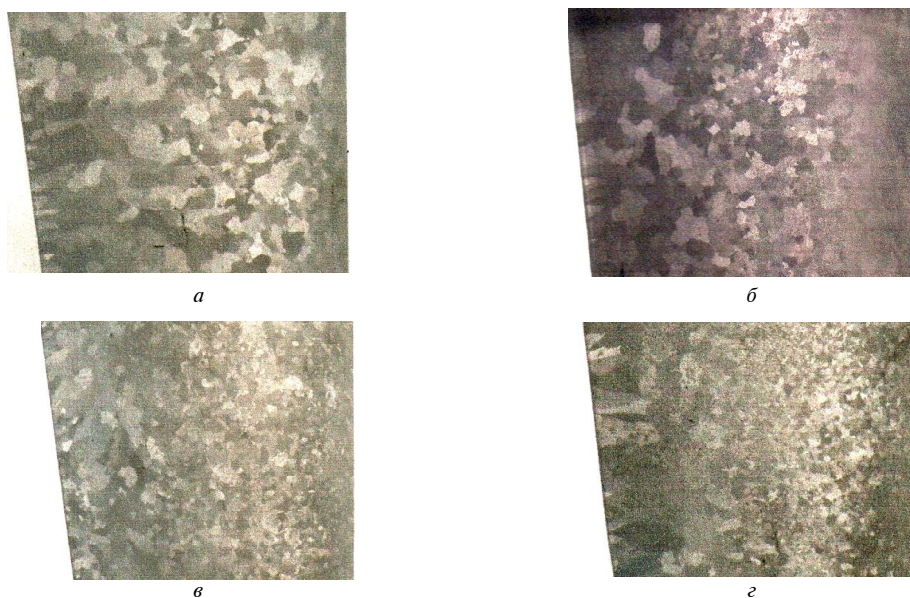


Рис. 2. Макроструктура пера лопаток со стороны спинки:

а – стандартная технология; б – суспензия с 5 % модификатора на поверхности стержня; в – 5 % модификатора в составе стержневой смеси; г – 10% модификатора в составе стержневой смеси



Рис. 3. Макроструктура лопаток в сечении $\times 1,5$:

a – стандартная технология; *б* – суспензия с 5 % модификатора на поверхности стержня; *в* – 5 % модификатора в составе стержневой смеси; *г* – 10 % модификатора в составе стержневой смеси

На внутренней поверхности лопаток с модифицированием (варианты 2, 3, 4) наблюдалась мелкодисперсная макроструктура из полиэдрических зерен, величиной 0,5–1,0 мм (рис. 4, б), а в лопатках без модифицирования – 2–5 мм (рис. 4, а). Влияния исследуемых содержаний модификатора в стержневой смеси на структуру лопаток не выявлено. В лопатках, полученных с использованием стержней с покрытием суспензией наблюдали равноосные зерна размерами 0,5–2,5 мм.

Микроструктура лопаток всех исследуемых вариантов характерна для сплава ЖС6У в термообработанном состоянии и представляла собой сложнелегированный твердый раствор на основе никеля, упрочненный интерметаллидной γ' -фазой типа $(\text{Ni,Co})_3(\text{Al,Ti})$, с наличием карбидов, карбонитридов и эвтектической $(\gamma - \gamma')$ -фазы. В лопатках с поверхностным модифицированием отмечается формирование микроструктуры размерами 0,4–0,5 мм. Существенного различия в микроструктуре в зависимости от исследуемых со-

держаний модификатора в стержневой смеси не отмечено (рис. 5, в, г). Установлено, что в лопатках с использованием стержней из опытной стержневой смеси уменьшалась усадочная пористость и размеры неметаллических включений по сравнению с лопатками без модифицирования (рис. 5, б, г).

Таким образом, опытно-промышленное опробование стержней, полученных по различным технологическим вариантам, показало, что использование модификатора алюмината кобальта в составе стержневой смеси улучшило технологичность и экономичность изготовления литых охлаждаемых деталей ГТД и обеспечило более однородную мелкозернистую макроструктуру поверхностей отливок. Применение алюмината кобальта в составе стержневой смеси снизило количество рыхлот и неметаллических включений в сплаве. Увеличение его содержания с 5 % до 10 % в составе стержневой смеси не оказало какого-либо существенного воздействия на структуру отливок.

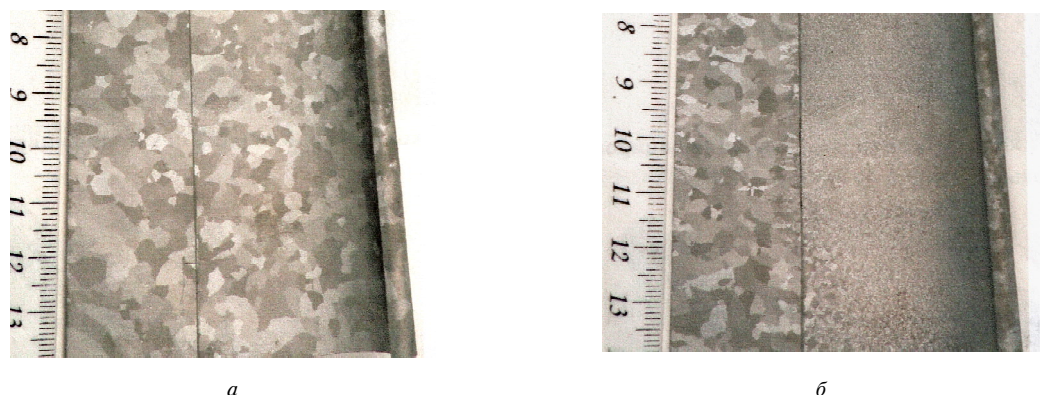


Рис. 4. Макроструктура внутренней поверхности лопаток:

a – стандартная технология; *б* – 5 % модификатора в составе стержневой смеси

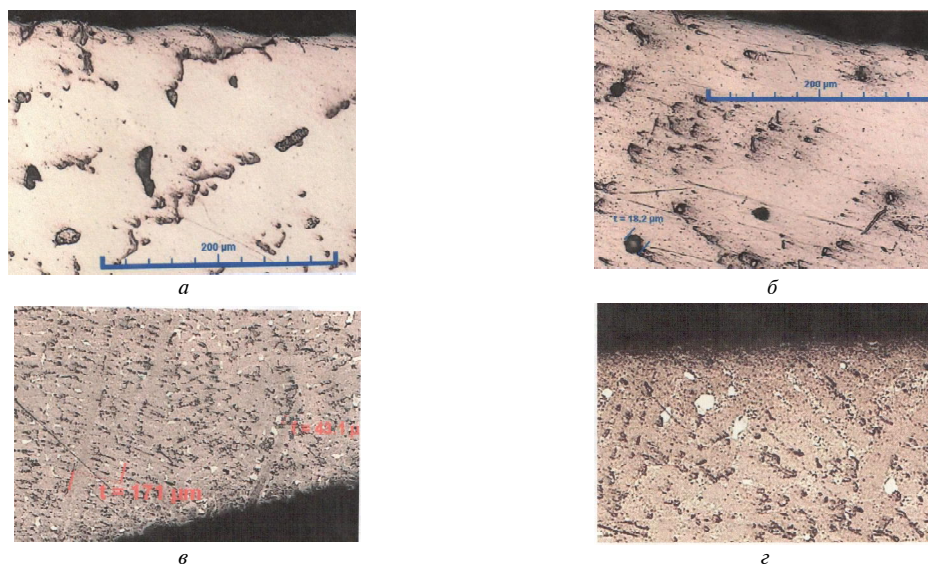


Рис. 5. Микроструктура лопаток у поверхні внутрішньої порожнини:

a – стандартна технологія, $\times 250$; *б* – суспензія з 5 % модифікатора на поверхні стержня, $\times 250$;
в – 5 % модифікатора в складі стержневої суміші, $\times 50$; *г* – 10 % модифікатора в складі стержневої суміші, $\times 50$

Список литературы

1. Каблов Е. Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия) / Е. Н. Каблов. – М.: МИСИС. – 2001. – 632 с.
2. Цивирко Э. И. Измельчение структуры внутренних поверхностей охлаждаемых деталей ГТД / Э. И. Цивирко, А. А. Педаш // Вестник двигателестроения. – 2010. – № 1. – С. 99–103.
3. Патент №2151017 Россия, МПК В22С1/00 Суспензия для изготовления литейных керамических форм / Е. Н. Каблов, В. Г. Чубаров; заявитель и патентообладатель ВНИИАМ. – № 98114785/02; заявл. 29.07.1998; опубл. 20.06.2000.
4. Патент на корисну модель 48858. Україна, МПК В22С3/00 Спосіб отримання пористих виливків з жароміцних сплавів на основі нікелю / О. О. Педаш, Е. І. Цивірко, П. Д. Жеманюк, О. Ф. Педаш; заявник і патентовласник ВАТ «Мотор Січ». – № u 200909446; заявл. 04.09.2009; опубл. 25.02.2010, Бюл. № 7. 5. Bustnes J. A. Investigation on reduction CoAl_2O_4 by hydrogen gas using TGA / [J. A. Bustnes, N. N. Viswanatan, Du Sichen, etc.] // Metallurgical and materials transactions. – 2000. – № 31B. – P. 540–542.

Поступила в редакцію 13.05.2011

Педаш О.О., Коломойцев О.Г., Цивірко Е.І. Стрижні з алюмінатом кобальту для відповідального лиття ГТД

Проведено дослідно-промислове випробування стрижнів виготовлених із застосуванням алюмінату кобальту, для поверхневого модифікуванням охолоджуваних литих лопаток газотурбінних двигунів з нікелевого жароміцного сплаву ЖС6У. При цьому, модифікатор наносився у вигляді суспензії на керамічний стрижень або вводився безпосередньо у стрижневу суміш. Встановлено, що стрижні, котрі виготовлені із суміші з 5 % (об.) алюмінату кобальту, забезпечували більш однорідну та щільну структуру внутрішніх поверхонь охолоджуваних виливків.

Ключові слова: керамічний стрижень, алюмінат кобальту, поверхневе модифікування, жароміцний сплав.

Pedash A., Kolomoitzev A., Tzivirko E. Ceramic rods with a cobalt aluminate for responsible castings of gas-turbine engines

The carried out experimental-industrial testing of ceramic rods, which were produced with a cobalt aluminate application for surface modification of air-cooled castings from nickel-based superalloy ЖС6У. Modifier was inflicted in suspension content on the surface of ceramic rods or was added in core sand mixture. It was installed, that rods, which were produced from core sand mixture with 5 % cobalt aluminate content, provide homogeneous and dense structure of internal surfaces of air-cooled castings.

Key words: ceramic rod, cobalt aluminate, surface modification, heat-resistant alloy.