

УДК 669.014.018.44

А. А. Педаш¹, д-р техн. наук Э. И. Цивирко²¹ОАО «Мотор Сич», ²Национальный технический университет; г. Запорожье

ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОХЛАЖДАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ ГТД

Изучено влияние поверхностного модифицирования алюминатом кобальта на структуру внутренних поверхностей охлаждаемых деталей ГТД из никелевого жаропрочного сплава ЖС6У. Разработан способ нанесения суспензии с алюминатом кобальта на керамические стержни. Установлено, что поверхностное модифицирование внутренних поверхностей отливок позволяет получить сквозное измельчение макрозерна, а также улучшить микроструктуру.

Поверхностное модифицирование, жаропрочный сплав, алюминат кобальта, лопатки

Известно, что крупнозернистая структура металлов по сравнению с однородной мелкозернистой склонна к раннему зарождению усталостной трещины. Одной из причин более частого зарождения трещины на внутренней поверхности охлаждаемой лопатки, наряду с повышенной концентрацией напряжений от конструктивных элементов (ребер, штырьков и т.п.), является более грубая по сравнению с наружной поверхностью структура материала. Поэтому для повышения трещиностойкости и эксплуатационной долговечности целесообразно создавать мелкозернистую структуру и на внутренних поверхностях охлаждаемых деталей газотурбинных двигателей (ГТД) [1]. Для получения мелкозернистой макро- и микроструктуры применение поверхностного модифицирования имеет значительные перспективы [2]. В этом случае модификатор наносится на керамический стержень, который, в свою очередь, и формирует конфигурации и структуру внутренней поверхности будущей отливки. Предлагалось нанесение модификатора на стержень путем пропитки его в однокомпонентном растворе соли кобальта (азотнокислый или хлористый кобальт) или в многокомпонентном растворе солей кобальта и алюминия с последующей тепловой обработкой [1]. В последнее время все чаще применяется готовое порошкообразное соединение синтезированного алюмината кобальта.

В данной работе изучали влияние модифицирования алюминатом кобальта на структуру внутренних поверхностей охлаждаемых деталей ГТД.

Порошкообразный алюминат кобальта вводили в суспензию следующего состава: этилцелозоль (ГОСТ 18313-88) – 47,5 %, лак КО-815 (ГОСТ 11086-76) – 47,5 %, $\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ – 5 %. Суспензию готовили в стеклянной колбе, тщательно перемешивая стеклянной мешалкой в течение 15 мин. Затем раствору давали отстояться в течение не менее 1 часа. Перед нанесением покры-

тия на поверхность стержня, раствор тщательно перемешивали ручной мешалкой, не допуская выпадения осадка порошка на дно колбы. Поверхность стержня обезжиривали ацетоном с помощью кисти, а затем просушивали в течение 30 мин на воздухе. Суспензию на поверхность стержня наносили ручным пульверизатором сначала с одной стороны, и после выдержки на воздухе в течение 10 мин – с другой стороны. Затем просушивали стержни на воздухе при температуре 25–30 °С в течение 1–1,5 часа. Дополнительно покрытие просушивали в электропечи при 150–200 °С в течение 10–15 мин и охлаждали на воздухе. Для обеспечения хорошего сцепления покрытия с материалом стержня проводили их термическое упрочнение при температуре 1000 ± 20 °С. В итоге, поверхность стержня была однородной, без непокрытых мест и с хорошей адгезией покрытия к материалу основы стержня (рис. 1, а).

Готовые стержни запрессовывали в модели секторов сопловых аппаратов. При этом, в одной отливке предусматривалось использование двух стержней с покрытием и двух без покрытия. После выплавки модельной массы получали керамическую форму для заливки. В эту форму, нагретую до температуры 1000 °С, заливали сплав ЖС6У с температурой 1550 °С. После охлаждения получали отливку сектора соплового аппарата, с которого вырезали отдельные лопатки и с помощью гидротермического выщелачивания удаляли стержни.

Макроструктуру исследовали под бинокулярным микроскопом при увеличениях $\times 10$ –25, а микроструктуру при $\times 50$ –500. Травление на макроструктуру производили в реактиве состава 90 мл соляной кислоты + 10 мл перекиси водорода, а на микроструктуру в реактиве Марбле (40 г медного купороса, 20 мл концентрированной соляной кислоты, 20 мл дистиллированной воды).



Рис. 1. Керамические стержни с нанесенным покрытием из алюмината кобальта (а) и без него (б)

Химический состав исследуемых лопаток соответствовал требованиям ОСТ 1.90127-85 для сплава ЖС6У (табл. 1).

В отливках из сплава ВЖЛ12Э-ВИ с поверхностным модифицированием наблюдается после ЛЮМ-контроля значительно меньшее количество поверхностных дефектов и микропор усадочного характера по сравнению с отливками без модифицирования (рис. 2). Поэтому и на внутренних поверхностях с большой вероятностью можно ожидать подобных результатов.

На поверхности лопаток без модифицирования выделяли три зоны, в которых макрозерно отличалось по размеру и морфологии (рис. 3, а). В первой зоне (от центра лопатки до выходной кромки) наблюдали разноразмерность, когда рядом со столбчатыми наблюдали равноосные зерна размером до 3,5 мм (табл. 2). Во второй зоне (на выходных кромках) отмечается более дисперсное равноосное макрозерно размерами от 0,1 до 1,5 мм. В третьей зоне (центральная часть лопаток) равноосные зерна имели размеры от 1,5 до 2,8 мкм.



а



б

Рис. 2. Фрагменты сектора лопаток соплового аппарата из сплава ВЖЛ12Э-ВИ при люминесцентном контроле без (а) и с (б) поверхностным модифицированием

В сечении лопаток без модифицирования наблюдали равноосные зерна размером от 0,5 до 2,5 мм. Фиксировали 1–2 зерна на толщину стенки (рис. 3, б, табл. 2).

На внешней поверхности лопаток с модифицированием установили неоднородность макроструктуры по форме и размеру. При этом выделяли три зоны (рис. 3, в). Первой зоной считали участок возле выходной кромки, где наблюдали столбчатые зерна или зону смешанных зерен (как столбчатых, так и равноосных). Второй зоной считали центральную часть пера с мелкодисперсными зернами размером 0,1–1,0 мм (табл. 2). В третьей зоне в центре отливки и возле входной кромки наблюдали равноосные зерна размерами до 2 мм.

Таблица 1 – Химический состав сектора соплового аппарата из сплава ЖС6У

Объект исследования	Массовая доля элементов, %										
	C $\times 10^{-2}$	Cr	Co	Ti	Al	W	Mo	Nb	Fe	Zr $\times 10^{-2}$	V $\times 10^{-2}$
Отливка сектора СА	15,6	8,7	9,8	2,1	5,4	10,0	1,3	1,1	0,7	1,0	0,9
Нормы ОСТ 1.90126-85	13,0-20,0	8,0-9,5	9,0-10,5	2,0-2,3	5,1-6,0	9,5-11,0	1,2-2,4	0,8-1,2	$\leq 1,0$	$\leq 4,0$	$\leq 3,5$

В сечении лопаток выделяли две зоны: первую — зону внутренней полости и вторую — зону от внутренней полости к выходной кромке лопатки (рис. 3, з).

На внутренней поверхности лопаток с поверхностным модифицированием наблюдали мелкие зерна размерами от 0,1 до 0,8 мм, которые распространялись почти на всю толщину стенки отливки (табл. 2). Во второй зоне наблюдали

макрозерна равновесной формы и вытянутые размерами 2,0×6,0 мм. При этом в сечении располагались 2–4 зерна.

При изучении микроструктуры установили, что для модифицированного материала характерно измельчение структурных составляющих. Междендритные расстояния в участках модифицирования составляли 0,05–0,07 мкм, а в стенках пера лопаток без модифицирования 0,1–0,15 мкм (рис. 4).

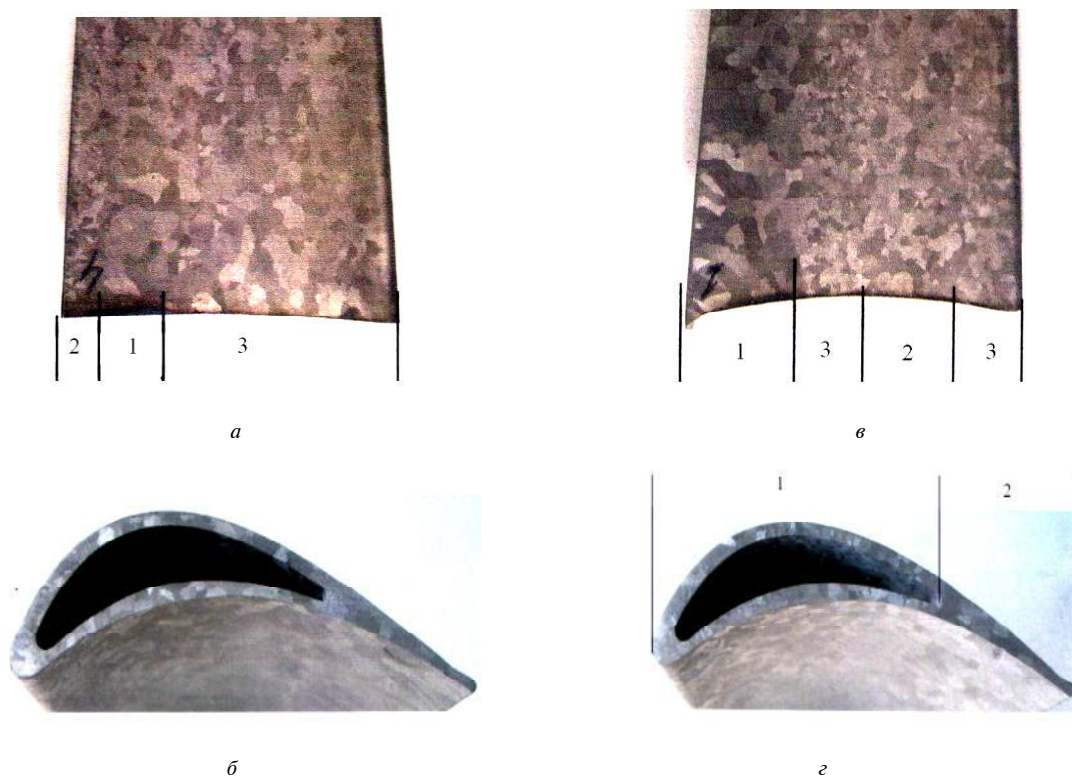


Рис. 3. Фрагменты охлаждаемых лопаток из сплава ЖС6У без модифицирования внутренней поверхности (а, б) и с ним (в, з): а, в — перо; б, з — сечение

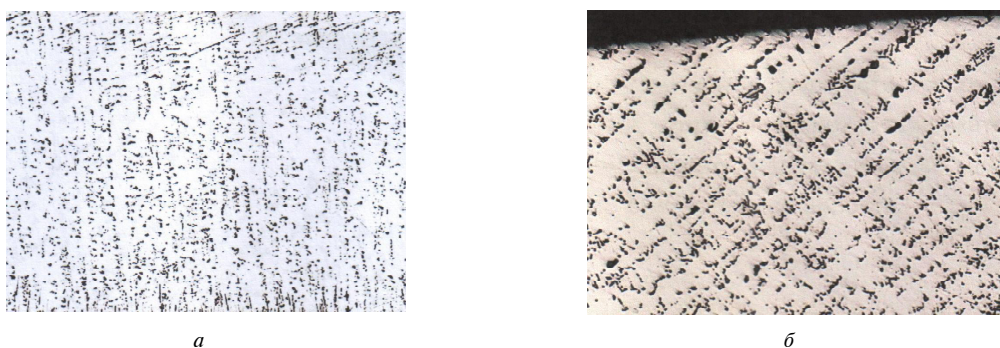


Рис. 4. Дендритная структура материала лопаток с поверхностным модифицированием (а) и без него (б):

а — × 62,5; б — × 125

Микроструктура нетермообработанного сплава ЖС6У представляла собой γ -твердый раствор с наличием интерметаллидной γ' -фазы и эвтектической (γ - γ')-фазы, карбидов и карбонитридов. Карбиды в сплаве имели преимущественно сферическую форму. Эвтектическая (γ - γ')-фаза формировалась в виде отдельных конгломератов.

В немодифицированном материале установили наличие рыхлот, пор усадочного характера размером приблизительно 30 мкм (рис. 5). После поверхностного модифицирования уровень загрязнения неметаллическими включениями существенно снижился. В стенках лопаток с поверхностным модифицированием присутствовали поры размером до 18 мкм, тогда как в лопатках

без модифицирования их размеры были значительно больше (до 50 мкм).

Таким образом, в результате проведенных работ в промышленных условиях опробован способ поверхностного модифицирования отливок охлаждаемых деталей горячего тракта ГТД. При этом в качестве модификатора использовалась специально разработанная суспензия с вводом в нее 5 % алюмината кобальта. Суспензия наносилась на керамические стержни и имела прочную связь с поверхностью. Подобное модифицирование позволило получать более высокую однородность и плотность поверхности (без усадочной пористости), значительное измельчение макрозерна и дендритных ячеек, а также рыхлот и неметаллических включений в сплаве.

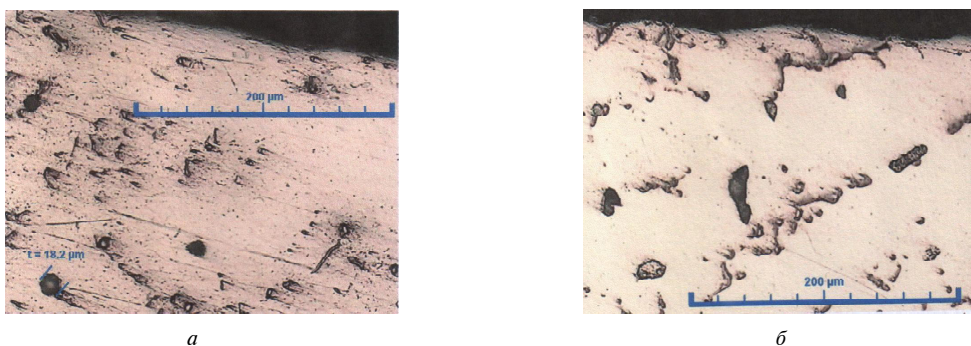


Рис. 5. Неметаллические включения, поры и рыхлоты в лопатках с поверхностным модифицированием (а) и без него (б)

Таблица 2 – Размеры макрозерна в лопатках сектора соплового аппарата из сплава ЖС6У

Поверхность пера			Сечение	
Выходная кромка	Центр	Входная кромка	Внутренняя бандажная полка	Внешняя бандажная полка
Без модифицирования				
Зона смешанных зерен: 0,7–12,0÷ 3,0–15,0 мм (столбчатые) + 3,5 мм (равноосные) Зона дисперсных зерен: 0,1–1,5 мм	1,5-2,8 мм	1,5-2,8 мм	Зона 1 – 0,5–2,5 мм Зона 2 – 0,8–5,0 мм	Зона 1 – 0,2–2,0 мм Зона 2 – 2,0–3,0 мм
Поверхностное модифицирование				
~ 2,0 мм	0,3–1,0 мм	Зона смешанных зерен: 1,0-7,0÷ 3,0–15,0 мм (столбчатые) + ~ 3 мм (равноосные)	Зона 1 – 0,1–0,8 мм Зона 2 – 2,0 мм (равноосные) + 2,0-6,0 мм (столбчатые)	Зона 1 – 0,5 мм Зона 2 – 2,0-5,0 мм

Перечень ссылок

1. Каблов Е. Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия) / Каблов Е. Н. – М.: МИСИС. – 2001. – 632 с.
2. Богуслаев В. А. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД: моногр. ч. 2. Лопатки турбины; [2-е изд. перераб. и доп.] / [В. А. Богуслаев, Ф. М. Муравченко и П. Д. Жеманюк и др.]. – Запорожье, 2007. – 496 с.

Поступила в редакцию 10.07.2009

A. A. Pedash, E. I. Tsivirko

CRUSHING THE STRUCTURE OF INTERNAL SURFACE COOLING PARTS GTE

Досліджено вплив поверхневого модифікування алюмінієм кобальту на структуру внутрішніх поверхонь охолоджуваних деталей ГТД з нікелевого жароміцного сплаву ЖС6У. Розроблено спосіб нанесення суспензії з алюмінієм кобальту на керамічні стержні. Встановлено, що поверхневе модифікування внутрішніх поверхонь виливків дозволяє отримати наскрізне подрібнення макрозерна, а також покращити макроструктуру.

Поверхневе модифікування, жароміцний сплав, алюмінієв кобальту, лопатки

There is studied influence of cobalt-aluminum surface modification on the structure of internal surfaces of the cooled gas-turbine engine parts made of ЖС6У heat-resistant nickel alloy. There is developed method of cobalt-aluminum suspension application on ceramic rods. It is determined that surface modification of internal surfaces of castings allows to get end-to-end atomization of macrograins, as well as to improve microstructure.

Surface modification, heat-resistant alloy, cobalt aluminate, blades