

УДК 669.014.018.44

Канд. техн. наук П. Д. Жеманюк¹, А. А. Педаш¹,
д-р техн. наук Э. И. Цивирко², А. Ф. Педаш¹

¹АО «МОТОР СИЧ», ²Запорожский национальный технический университет; г. Запорожье

КОМБИНИРОВАННОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ДЕТАЛЕЙ ТУРБИН ГТД

Проведено опытно-промышленное опробование технологий комбинированного модифицирования при производстве отливок ответственных деталей турбин газотурбинных двигателей из жаропрочных никелевых сплавов ЖСЗЛС-ВИ, СМ939 и ВЖЛ12Э-ВИ. В качестве модификаторов использовали алюминат кобальта и чистый цирконий. Установлено, что комбинированное модифицирование позволило получить отливки без поверхностных дефектов, с мелкокристаллической макроструктурой, с улучшенной микроструктурой.

Ключевые слова: сопловой аппарат турбины, модифицирование, алюминат кобальта, цирконий, жаропрочный сплав.

Для ответственных отливок ГТД из жаропрочных никелевых сплавов, с целью улучшения их структуры и повышения свойств, применяют методы поверхностного и объемного модифицирования, а так же достаточно эффективное поверхностное модифицирование лазерным облучением электроискровых покрытий ($WC-Co-Al_2O_3$) и карбидно-керамических покрытий [1, 2]. При этом объемное модифицирование повышает пластичность и длительную прочность сплавов [3], а поверхностное – предел выносливости [4]. Комбинированное действие модификаторов позволяет одновременно измельчить макро- и микроструктуру, улучшить твердорастворное и дисперсионное упрочнение материала деталей.

Ранее [5–9] исследовано влияние поверхностного модифицирования алюминатом кобальта как отдельно, так и в комплексе с объемным модифицированием, на структуру и свойства жаропрочных никелевых сплавов. Показано [8–9], что улучшение структуры и повышение свойств достигается применением комбинированного модифицирования с цирконием.

В данной работе рассмотрено промышленное опробование технологий комбинированного модифицирования при производстве отливок сопловых аппаратов турбины из жаропрочных сплавов ЖСЗЛС-ВИ, СМ939, а также сектора лопаток соплового аппарата из сплава ВЖЛ12Э-ВИ.

На вакуумной плавильной установке УППФ-3М

однородную шихту весом ~ 8 кг, полученную методом высокотемпературной обработки расплава [6–7], расплавляли в основном тигле при 1580 ± 10 °С и за 1,5...2 мин до слива расплава, через загрузочное устройство печи, присаживали чистый металлический цирконий для получения его в сплаве – 0,08...0,12 % Zr. При остаточном давлении в печи 0,665 Па и температуре расплава 1550 °С заливали электрокорундовые керамические формы, полученные по выплавляемому моделию и нагретые до 950 ± 10 °С. Характерной особенностью форм являлось наличие в первом рабочем слое алюмината кобальта. Стержни для лопаток изготавливали с использованием электрокорунда. При получении отливок сопловых аппаратов из сплава СМ939 предусматривалось наличие заготовок образцов для определения механических свойств.

Исследуемые отливки проходили стандартную термическую обработку:

- отливки из сплава ЖСЗЛС-ВИ и ВЖЛ12Э-ВИ: нагрев 1210 °С, выдержка 4 часа, охлаждение в потоке аргона;

- отливки из сплава СМ939: нагрев 1165 °С, выдержка 4 часа, охлаждение с печью. Старение 920 °С, 6 часов, 980 °С, 4 часа, 800 °С, 4 часа, охлаждение с печью.

Химический состав отливок исследуемых вариантов удовлетворял требованиям нормативно-технической документации (табл. 1). Модифицированием получили в сплавах 0,07...0,12 % циркония.

Таблица 1 – Химический состав отливок исследуемых жаропрочных сплавов после комбинированного модифицирования

Марка сплава	Массовая доля элементов, %									
	C	Cr	Co	W	Nb	Al	Ti	Mo	Fe	Zr $\times 10^{-2}$
СМ 939	0,12	22,3	18,7	2,1	0,8	1,6	3,4	< 0,05	0,032	7,0
ЖСЗЛС-ВИ	0,07	16,2	3,7	4,2	–	2,6	2,7	3,8	0,8	11,0
ВЖЛ12Э-ВИ	0,17	9,3	8,8	1,6	0,7	5,3	4,4	3,0	0,2	9,0

Люминесцентным контролем было установлено, что отливки без комбинированного модифицирования имели значительные точечные свечения (рис. 1, *а–в*). По месту точечного свечения люминофора в металле наблюдалась усадочная микропористость, а также поверхностные дефекты (рис. 2). Технология комбинированного модифицирования позволила получить отливки практически без поверхностных дефектов (рис. 1, *г–ж*).

Макроструктура отливок из сплава СМ939 без модифицирования характеризовалась крупнозернистостью как по перу, так и в зоне бандажных полок (рис. 3, *а*, табл. 2), а в сплавах ЖСЗЛС-ВИ и ВЖЛ12Э-ВИ была меньшего размера (рис. 3, *б, в*, табл. 2). Величина макрозерна как на поверхности, так и в сечении отливок составляла 1,0...8,0 мм (в сплаве СМ939), 1,0...5,5 мм (в сплаве ЖСЗЛС-ВИ) и 2,5...5,0 мм в отливках из сплава ВЖЛ12Э-ВИ (табл. 2).

Комбинированное модифицирование значительно измельчало макрозерно в отливках всех исследуемых сплавов (рис. 3, *г–ж*, табл. 2). Зерна при этом приобретали столбчатое строение.

Структура отливок из сплава СМ939 характеризовалась среднекристаллическим строением (с размерами 1,0...5,0 мм) на входной кромке пера и на бандажных полках (рис. 3, *а*, табл. 2). Мелкое зерно (размерами 0,3...1,0 мм) наблюдали на выходных кромках.

Отливки из сплава ЖСЗЛС-ВИ имели однородную макроструктуру. Мелкое макрозерно

(с размерами 0,75...1,0 мм) наблюдали возле выходной кромки пера (рис. 3, *б*), а на бандажных полках его размеры увеличивались до 34 мм (табл. 2).

В отливках из сплава ВЖЛ12Э-ВИ после комбинированного модифицирования размеры макрозерна уменьшались в 2...5 раз, по сравнению с вариантом без модифицирования, особенно в зоне пера (табл. 2). В более массивных частях отливки (на бандажных полках) влияние модифицирования было меньшим. В сечении пера наблюдали зоны столбчатых зерен, направленных к центру отливки (рис. 3, *ж*). В центре наблюдались равноосные зерна.

Микроструктура материала исследуемых отливок представляла собой γ -твердый раствор на основе никеля (матрица сплава), упрочненный интерметаллидной γ' -фазой, с присутствием карбидов, карбонитридов и была характерной для сплавов ЖСЗЛС-ВИ, СМ939 и ВЖЛ12Э-ВИ в термообработанном состоянии.

В отливках всех исследуемых сплавов на границах зерен наблюдали дисперсные карбиды типа $Me_{23}C_6$ (рис. 4). Следует отметить, что в отливках сопловых аппаратов с комбинированным модифицированием границы зерен были более чистыми, чем в вариантах без модифицирования (рис. 4, *г, ж*).

В отливках из сплава ЖСЗЛС-ВИ после комбинированного модифицирования размеры карбидов уменьшались (табл. 3), тогда как в металле без модифицирования наряду с дискретными части-

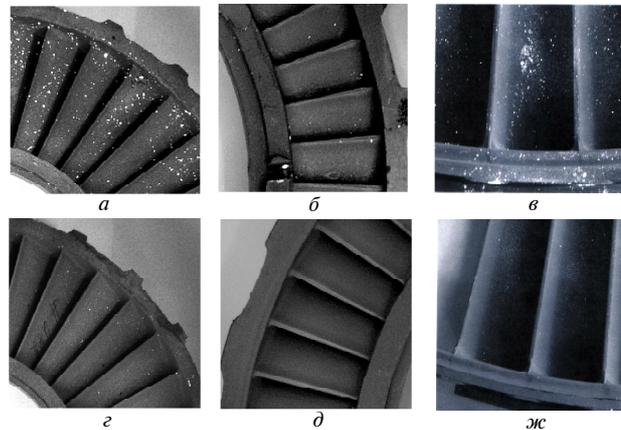


Рис. 1. Фрагменты исследуемых сопловых аппаратов из сплавов СМ939 (*а, г*, $\times 1,2$), ЖСЗЛС-ВИ (*б, д*, $\times 1,25$) и сектора лопаток соплового аппарата из сплава ВЖЛ12Э-ВИ (*в, ж*, $\times 2$) при люминесцентном контроле: *а, б, в* – без комбинированного модифицирования; *г, д, ж* – с комбинированным модифицированием

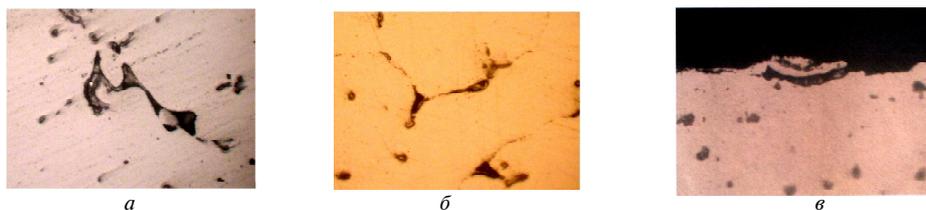


Рис. 2. Микропоры в местах свечения люминофора в исследуемых отливках из сплавов без комбинированного модифицирования, $\times 300$: *а* – СМ939; *б* – ЖСЗЛС-ВИ; *в* – ВЖЛ12Э-ВИ

Таблица 2 – Размеры макрзерна в исследуемых отливках из никелевых сплавов

Марка сплава	Величина макрзерна, мм				
	Перо			Бандажная полка	
	На поверхности		В сечении	Верхняя	Нижняя
	входная кромка	выходная кромка			
СМ939	<u>2,0...8,0*</u>	<u>1,0...4,0</u>	<u>0,5...7,0</u>	<u>3,0...8,0</u>	<u>2,0...7,0</u>
	1,0...4,0	0,3...1,0	0,15...3,0	1,5...6,0	0,5...5,0
ЖСЗЛС-ВИ	<u>1,0...3,0</u>	<u>0,5...1,25</u>	<u>0,5...1,5</u>	<u>1,0...5,5</u>	<u>1,0...5,0</u>
	0,5...1,0	0,1...0,75	0,2...1,0	0,5...4,0	0,5...3,0
ВЖЛ12Э-ВИ	<u>0,5...2,5</u>		<u>0,1...2,5</u>	<u>0,75...5,0</u>	<u>2,5...5,0</u>
	0,25...0,5		0,5...1,25	0,5...2,5	1,0...3,5

Примечание: *Числитель – без модифицирования, знаменатель – комбинированное модифицирование

Таблица 3 – Размеры карбидов в структуре сопловых аппаратов из сплава ЖСЗЛС-ВИ

Вариант модифицирования	Размер карбидов, мкм			
	перо		бандажная полка	
	глобулярные	пленочные	глобулярные	пленочные
Без модифицирования	2,0...12,0 (единичные до 20)	до 50,0	2,0...15,0 (единичные до 30)	до 38,0
CoAl ₂ O ₄ +Zr	1,0...8,0 (единичные до 10)	до 8,0	1,0...10,0 (единичные до 18)	до 15,0

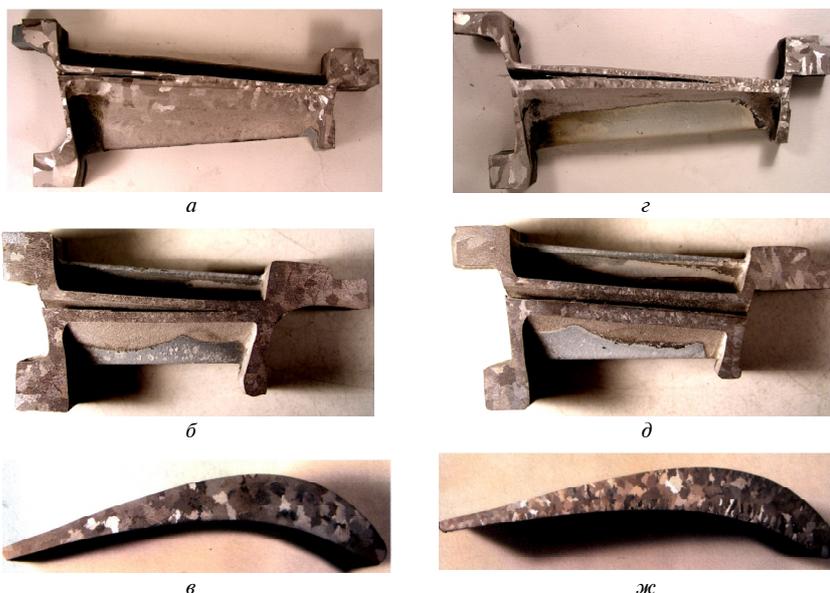


Рис. 3. Макрзерно в отливках из сплавов СМ939 (а, г, $\times 2,3$), ЖСЗЛС-ВИ (б, д, $\times 1,5$) и ВЖЛ12Э-ВИ (в, ж, $\times 3$) в сечении: а, б, в – без комбинированного модифицирования; г, д, ж – после комбинированного модифицирования

цами карбидов наблюдались по границам зерен грубые скопления пленочных карбидов размерами до 50 мкм (рис. 4, б). В отливках с комбинированным модифицированием кроме глобулярных карбидов наблюдали пленочные карбидные выделения, располагавшиеся по границам зерен (рис. 4, в). Протяженность этих карбидов в зоне пера – 8 мкм, а в зоне бандажных полок – 15 мкм (табл. 3).

Механические свойства при комнатной температуре и время до высокотемпературного разрушения определяли на образцах из сплава СМ939. Установлено их соответствие требованиям НТД. При этом время до разрушения превышало тре-

буемые нормы более чем в 10 раз и в дальнейшем неразрушенные образцы снимались с испытательной установки.

Таким образом, проведенное промышленное опробование технологии комбинированного модифицирования позволило получить отливки без поверхностных дефектов, с мелкокристаллической макроструктурой, с улучшенным состоянием границ зерен и благоприятным состоянием карбидной составляющей. После комбинированного модифицирования время до высокотемпературного разрушения превысило требуемые нормы более чем в 10 раз.

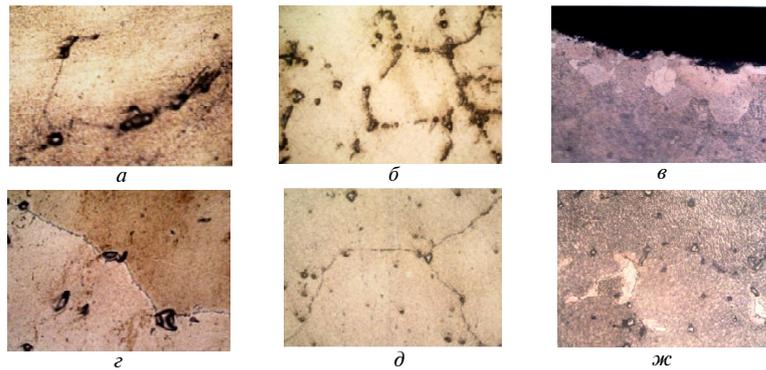


Рис. 4. Микроструктура в зоне бандажных полок лопаток из сплавов СМ939 (а, г), ЖСЗЛС-ВИ (б, д) и ВЖЛ12Э-ВИ (в, ж), $\times 500$: без модифицирования (а–в) и с комбинированным модифицированием (г–ж)

Список литературы

1. Radek N. Cermet ESD coatings modified by laser treatment / N. Radek, J. Konstanty // Archives of Metallurgy and Materials, Vol. 57, Issue 3, (2012), P. 665–670.
2. Radek N. Performance properties of electro-spark deposited carbide-ceramic coatings modified by laser beam / N. Radek, K. Bartkowiak // Physics Procedia (Elsevier), N 5 (2010), P. 417–423.
3. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Часть 2 / Лопатки турбины : монография / [В. А. Богуслаев, Ф. М. Муравченко, П. Д. Жеманюк и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – г. Запорожье, изд.-во ОАО «Мотор Сич», 2007. – 496 с.
4. Каблов Е. Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия). – М. : МИСИС, 2001. – 632 с.
5. Измельчение структуры отливок ГТД модифицированием / [Э. И. Цивирко, А. А. Педаш, Н. А. Лысенко и др.] // Вестник двигателестроения. – 2004. – № 3. – С. 112–116.
6. Улучшение структуры и свойств никелевого жаропрочного сплава ЗМІЗУ-ВИ / [Н. А. Лысенко, А. А. Педаш, А. Г. Коломойцев и др.] // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2005. – № 2. – С. 34–39.
7. Структура и свойства сплава ЖСЗЛС-ВИ различных вариантов выплавки и модифицирования / [Н. А. Лысенко, А. А. Педаш, А. Г. Коломойцев и др.] // Вестник двигателестроения. – 2005. – № 3. – С. 144–149.
8. Педаш О. О. Комбіноване модифікування рафінованого жароміцного сплаву ЗМІЗУ-ВІ / О. О. Педаш, Е. І. Цивірко // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2008. – № 2. – С. 8–13.
9. Педаш А. А. Влияние модифицирования однородного расплава на структуру и свойства сплава ЖСЗЛС-ВИ / А. А. Педаш, Э. И. Цивирко // Вестник двигателестроения. – 2008. – № 2. – С. 171–177.

Поступила в редакцию 08.12.2012

Жеманюк П.Д., Педаш О.О., Цивирко Е.І., Педаш О.Ф. Комбіноване модифікування при отриманні деталей турбін ГТД

Проведено дослідно-промислове випробування технологій комбінованого модифікування при виробництві виливків відповідальних деталей турбін газотурбінних двигунів з жароміцних нікелевих сплавів ЖСЗЛС-В, СМ939 и ВЖЛ12Е-В. У якості модифікаторів використовували алюмінат кобальту та чистий цирконій. Встановлено, що комбіноване модифікування дозволило отримати виливки без поверхневих дефектів, з дрібнокристалічною макроструктурою та з покращеною мікроструктурою.

Ключові слова: сопловий апарат турбіни, модифікування, алюмінат кобальту, цирконій, жароміцний сплав.

Zhemanjuk P., Pedash A.A., Tsvirko E., Pedash A.F. Combined inoculation in production of GTE turbine parts

The experimental-industrial testing of combined inoculation processes was conducted in production of critical castings of GTE turbine parts made of nickel-based superalloys ЖСЗЛС-ВИ, СМ939 and ВЖЛ12Э-ВИ. As inoculants use was made of cobalt aluminate and pure zirconium. It was found that combined modification made it possible to obtain fine-crystalline castings with improved microstructure and free from surface defects.

Key words: turbine NGV, inoculation, cobalt aluminate, zirconium, superalloy.