

УДК 621.74.045:669.046.516

Д-р техн. наук А. Я. Качан¹, канд. техн. наук Н. А. Лысенко², А. С. Дудников³,
С. А. Уланов¹

¹Запорожский национальный технический университет, ²АО «Мотор Сич»,

³Авиационный колледж им. А. Г. Ивченко; г. Запорожье

КАЧЕСТВО ОТЛИВОК РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ НАНОЧАСТИЦАМИ ТУГОПЛАВКИХ СОЕДИНЕНИЙ И ОБРАБОТАННЫХ ГИП

Рассмотрено влияние наночастиц карбонитрида титана и последующих ГИП и термообработки на качество отливок рабочих лопаток турбины за счет повышения стабилизации структурной однородности сплава.

Ключевые слова: лопатка, модифицирование, горячее изостатическое прессование, структурная однородность, микроструктура, термообработка, наночастицы, карбонитрид титана.

Введение

Широкое применение при изготовлении рабочих лопаток турбины газотурбинных двигателей (ГТД) и энергетических установок получили жаропрочные никелевые сплавы [1].

Перспективным направлением повышения эксплуатационных характеристик рабочих лопаток турбины является модифицирование жаропрочных никелевых сплавов наночастицами тугоплавких соединений [2].

Эффективным способом повышения качества отливок деталей из жаропрочных никелевых сплавов является горячее изостатическое прессование (ГИП), сущность которого состоит в всестороннем сжатии отливок газами при высоких температурах [3].

Поэтому важным является исследование влияния комбинированных технологий на качество отливок рабочих лопаток турбины из жаропрочных никелевых сплавов, включающих модифицирование расплава наночастицами тугоплавких соединений и последующее горячее изостатическое прессование и термообработку.

Цель работы – оценка влияния комбинированной технологии на качество отливок рабочих лопаток турбины из жаропрочного никелевого сплава.

Объект исследования – отливки рабочих лопаток турбины вентилятора 2-й ступени из жаропрочного никелевого сплава ЖСЗДК-ВИ.

Методы исследований

Исследования проводились на заготовках-отливках рабочей лопатки 2-й ступени вентилятора из жаропрочного никелевого сплава ЖСЗДК-ВИ после выполнения следующих технологических операций:

1. Модифицирование карбо-нитридными частицами титана (в виде таблеток $Ti[Ti(C,N)]$) с последующей обработкой горячим изостатическим прессованием;

2. После газостатической обработки без проведения операции модифицирования карбонитридом титана;

3. Термообработка отливок лопаток после ГИП проводилась по стандартному режиму (гомогенизация при температуре 1210^{+15} °С в течение 3,5 часов с охлаждением на воздухе).

Процесс горячего изостатического прессования проводили по следующему режиму:

- начальное давление в СВД – 25 МПа;
- нагрев от комнатной температуры до $T = 950 \pm 10$ °С со скоростью 8 °С/мин;

- выдержка при температуре 950 ± 10 °С – 1 час;

- нагрев до температуры 1210 ± 10 °С со скоростью – 4 °С/мин;

- выдержка при температуре 1210 ± 10 °С – 3 часа;

- давление в СВД при температуре 1210 °С – 160 МПа;

- при охлаждении отливок использовалась функция быстрого охлаждения в аргоне.

Макроструктуру выявляли методом химического травления в реактиве, состоящем из 80 % HCl и 20 % H₂O₂.

Результаты исследований и их обсуждение

Химический состав лопаток турбины, отлитых из сплава ЖСЗДК-ВИ, после ГИП (как без присадки модификатора, так и модифицированных карбонитридом титана $Ti[Ti(C,N)]$), соответствовал требованиям ОСТ 1.90.126-85, табл. 1.

Таблица 1 – Химический состав лопаток турбины из сплава ЖСЗДК-ВИ, после ГИП без присадки модификатора и модифицированных карбонитридом титана Ti[Ti(C,N)]

Состояние материала лопатки	Содержание элементов, %										
	C	Cr	Co	W	Al	Ti	Mo	Fe	Si	Mn	S
ГИП (без присадки Ti[Ti(C,N)])	0,08	11,5	9,76	4,38	4,50	2,59	4,02	0,20	0,06	<0,4	0,003
ГИП + Ti[Ti(C,N)]	0,09	11,64	9,76	4,47	4,52	2,69	4,00	0,18	0,07	<0,4	0,003
Нормы ОСТ190126-85	0,06-0,11	11,0-12,5	8,0-10,0	3,8-4,5	4,0-4,8	2,5-3,2	3,8-4,5	≤ 2,0	≤ 0,4	≤ 0,4	≤ 0,015

Макроструктура газостатированных лопаток турбины без модифицирования, а также с присадкой модификатора на поверхности и в сечениях пера и хвостовика представлена на рис. 1.

Величина макрозерна в пере лопатки турбины, отлитой с присадкой Ti[Ti(C,N)], в ~ 6 раз меньше, чем без присадки (см. рис. 1, табл. 2).

В хвостовой части уменьшение размера макрозерна модифицированных лопаток в сравне-

нии с серийной лопаткой незначительно и составляет ≈ 30 %.

В макроструктуре хвостовика отливки серийной лопатки у поверхности наблюдаются кристаллы, вытянутые в направлении отвода тепла при кристаллизации, а в пере лопатки – равномерная по сечению равноосная структура (см. рис. 1, а).

В пере и хвостовике модифицированной лопатки проявляется равномерная по сечению равноосная структура (см. рис. 1, б).

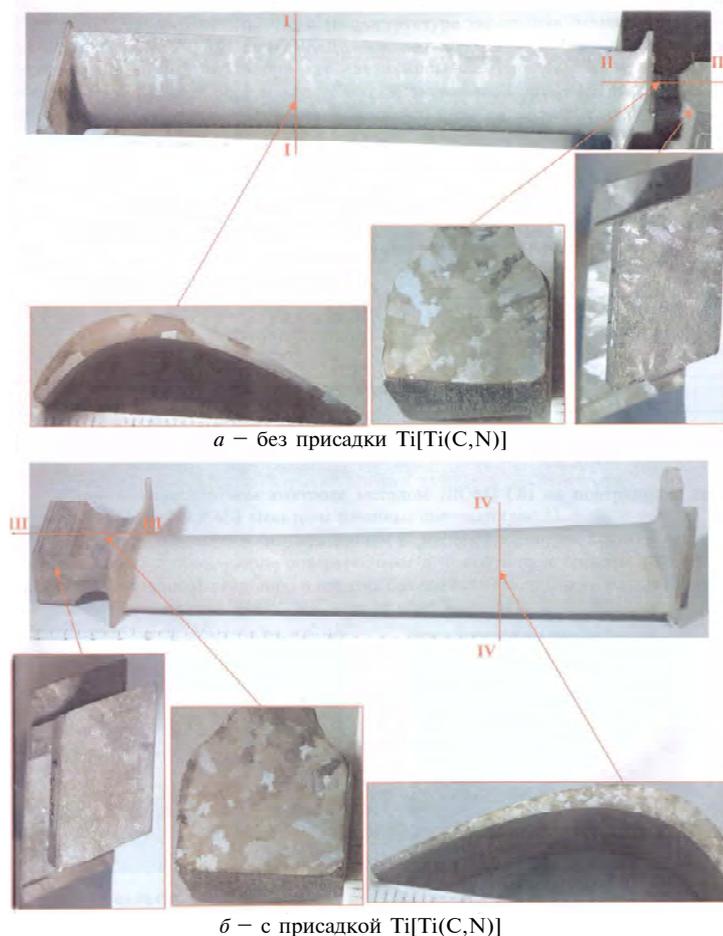


Рис. 1. Макроструктура заготовок-отливок газостатированных рабочих лопаток турбины вентилятора 2-й ступени, отлитых по серийной технологии (а – без модифицирования Ti[Ti(C,N)]), а также модифицированных Ti[Ti(C,N)] (б)

Величина макрозерна в пере и хвостовике немодифицированной лопатки примерно одинакова и составляет 2,0...4,5 мм (см. табл. 2).

В лопатке, модифицированной Ti[Ti(C,N)], размер зерна в пере в ~ 4 раза меньше, чем в хвостовой части (см. табл. 2).

При люминесцентном контроле методом ЛЮМ1-ОВ на поверхности пера лопаток выявлены точечные свечения.

Металлографическим исследованием в местах с наличием точечных свечений люминофора обнаружены поверхностные дефекты в виде соровых раковин и плен, проникающих в глубину: в лопатке без присадки модификатора – до 27 мкм, а в лопатке с присадкой Ti[Ti(C,N)] – до 14 мкм (рис. 2).

Люминесцентный контроль методом ЛЮМ1-ОВ в осевом сечении хвостовика и поперечном се-

чении пера лопаток после ГИП показал, что как в немодифицированной так и после модифицирования, точечное свечение люминофора, характерное для микропористости и усадочной рыхлости отсутствуют. ГИП способствует «залечиванию» пор и рыхлот. Размер выявленных после ГИП единичных микропор в хвостовой части лопаток составляет ~ 5 мкм без присадки и ~ 4 мкм с присадкой Ti[Ti(C,N)] (рис.3).

В пере лопаток после ГИП микропоры не обнаружены.

В немодифицированных лопатках, отлитых из сплава ЖСЗДК-ВИ, наряду с карбидами типа MeC, имеющими глобулярную морфологию, в междендритных пространствах и на границах зерен наблюдается выделение эвтектических карбидов в виде пластин (типа Me₆C), так называемых «китайских иероглифов» (рис. 4).

Таблица 2 – Параметры макроструктуры отливок газостатированных рабочих лопаток турбины вентилятора 2-й ступени, отлитых по серийной технологии и после модифицирования Ti[Ti(C,N)]

Состояние сплава	Инд. номер лопатки	Место измерения	Размер макрозерна, мм	Зона столбчатых кристаллов, мм
ГИП (без присадки модификатора)	479	перо	2,0...4,5 (ед. до 7)	-
		хвостовик	2,0...4,5 (ед. до 7)	до 7
ГИП + Ti[Ti(C,N)]	483	перо	0,4...1,0	-
		хвостовик	0,9...3,5	-

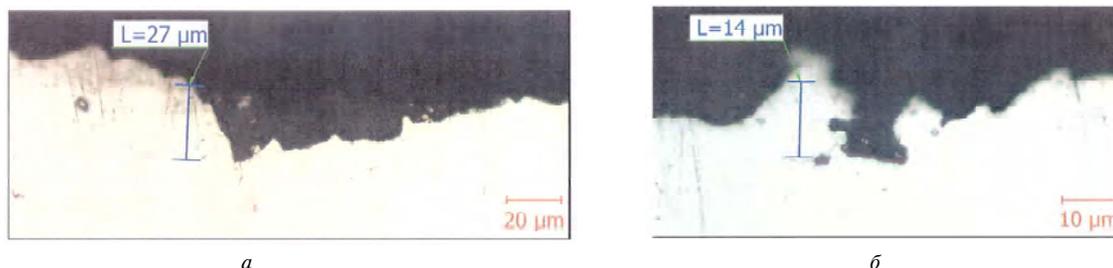


Рис. 2. Соревые раковины и пленки на поверхности отливок газостатированных лопаток турбины, отлитых (а) – без Ti[Ti(C,N)], а также модифицированных Ti[Ti(C,N)] (б), × 500

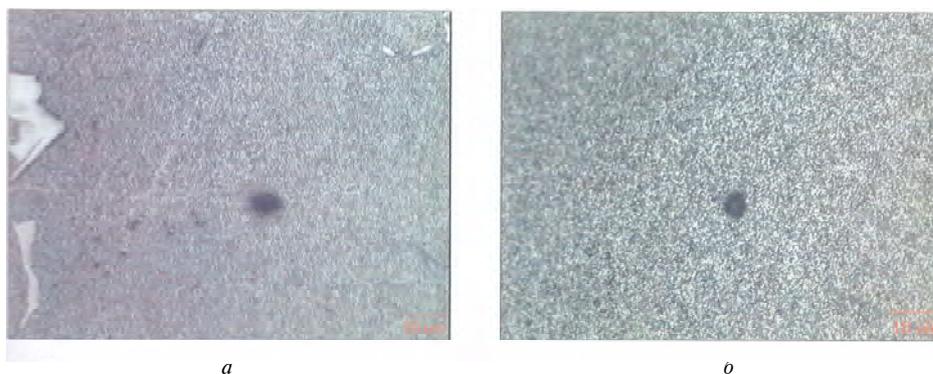


Рис. 3. Микропористость в хвостовой части отливок лопаток турбины после ГИП:

а – лопатка турбины без присадки Ti[Ti(C,N)]; б – лопатка турбины с присадкой Ti[Ti(C,N)]

Модифицирование сплава $Ti[Ti(C,N)]$ способствует изменению морфологии первичных карбидов (типа Me_6C), которые приобретают более благоприятную форму. Наблюдается дробление пластин эвтектических карбидов. При этом как в хвостовой части, так и в пере модифицированных лопаток имеются небольшие участки с наличием эвтектических карбидов пластинчатой морфологии (рис. 5, табл. 3). Кроме того, в модифи-

цированных лопатках карбиды и карбонитриды равномерно распределены в объеме металла.

Микроструктура лопатки после ГИП (без присадки карбонитрида титана) представляет собой γ твердый раствор с наличием интерметаллидной γ' - фазы, карбидов и небольшого количества карбонитридов и соответствует сплаву ЖСЗДК–ВИ в нормально термообработанном состоянии (рис. 6).

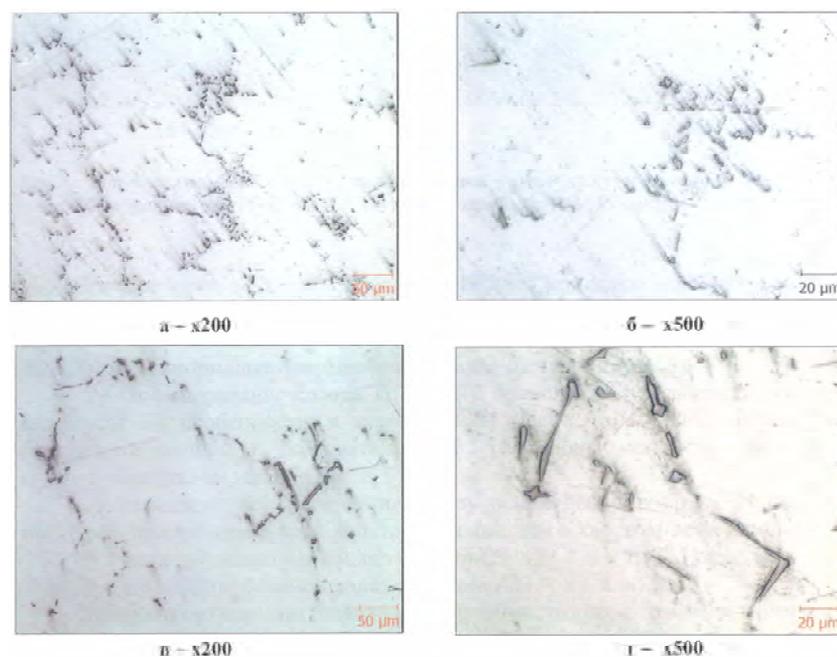


Рис. 4. Морфология карбидов и карбонитридов в пере (а, б) и хвостовике (в, г) отливки лопатки турбины после ГИП без присадки $Ti[Ti(C,N)]$

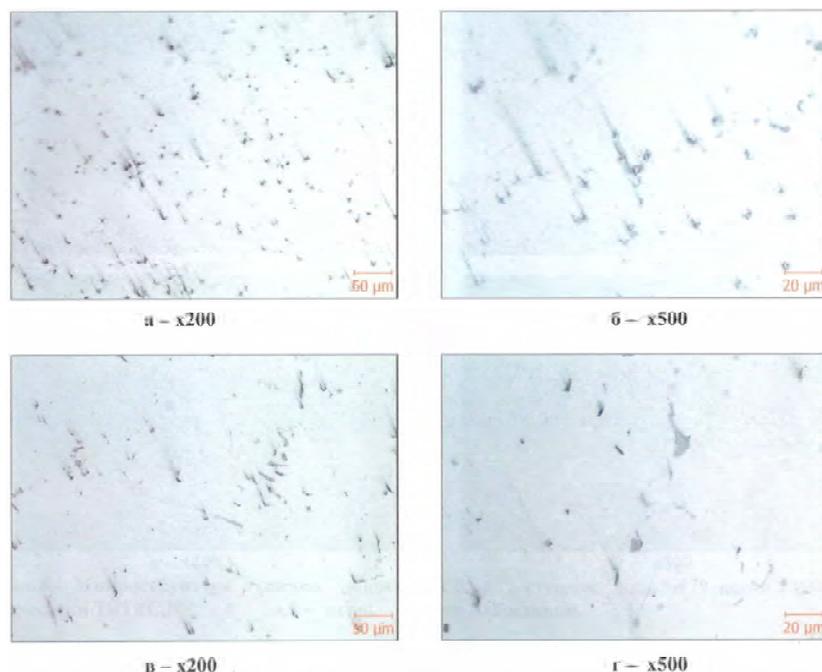
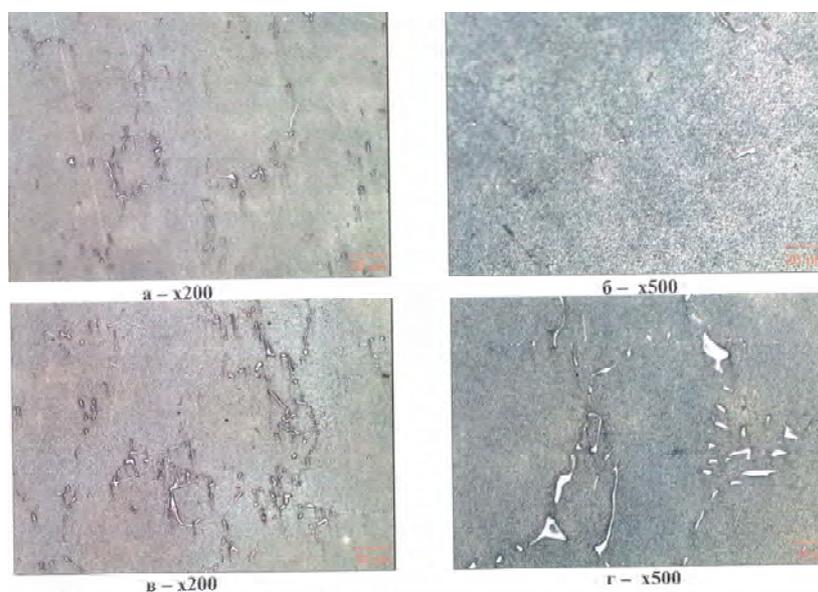


Рис. 5. Морфология карбидов и карбонитридов в пере (а, б) и хвостовике (в, г) отливки лопатки турбины с присадкой $Ti[Ti(C,N)]$

Таблица 3 – Параметры структурных составляющих в газостатированных лопатках турбины из сплава ЖСЗДК-ВИ (до и после модифицирования)

Состояние материала		Размеры структурных составляющих, мкм				
		карбиды		нитриды	микропоры	расстояние между осями дендритов 2-го порядка
		глобулярные типа МС	эвтектические (пластинчатые) типа M_6C			
ГИП (без присадки модификатора)	перо	2...5	5...35	практически отсутствуют	–	25...40
	хвостовик	3...15	7...85	≈ 4	единичные до 5	50...70
ГИП Ti[Ti(C,N)]	перо	0,75...4	4...15	≈ 2	–	7...12
	хвостовик	2...10	5...60	до 9	единичные до 5	45...60

**Рис. 6.** Микроструктура отливки лопатки турбины после ГИП без присадки Ti [Ti(C,N)]:
а, б – перо; в, г – хвостовик

Модифицирование сплава Ti[Ti(C,N)] приводит к измельчению дендритной структуры (в особенности в пере) (рис. 7).

При этом уменьшается размер дендритной ячейки, а также расстояние между осями дендритов второго порядка (см. табл. 3).

Установлено, что расстояние между осями дендритов второго порядка, а также размер карбидов в пере лопаток меньше, чем в хвостовике (см. табл. 3):

- в немодифицированной лопатке – в 2...2,5 раза;

- в модифицированной лопатке – в 4...5 раз.

Микроструктурное состояние в местах «залечивания» микропор и рыхлоты усадочного характера показано на рис. 8.

Установлено, что термообработка по стандартному режиму (1210 °С, 3,5 часа) после ГИП спо-

собствует практически полной перекристаллизации упрочняющей интерметаллидной γ' - фазы, заключающейся в растворении в γ матрице фазы γ' и повторном ее выделении в виде дисперсных частиц кубической морфологии с наличием небольшого количества скоагулированной интерметаллидной γ' - фазы, что приводит к повышению структурной однородности сплава и релаксации напряжений в процессе ГИП.

Выводы

1. Качество материала отливок рабочих лопаток 2-ой ступени турбины вентилятора, отлитых из сплава ЖСЗДК-ВИ, модифицированного наноразмерными частицами карбонитрида титана в виде таблеток Ti[Ti(C,N)] после обработки методом горячего изостатического прессования отвечает требованиям ОСТ1.90.126-85.

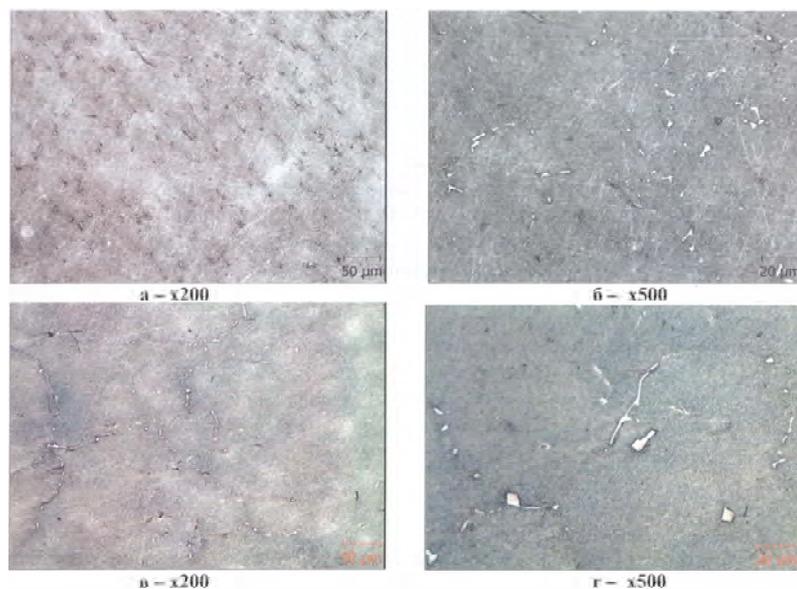


Рис. 7. Микроструктура отливки лопатки турбины после ГИП с присадкой Ti [Ti(C,N)]: а, б – перо; в, г – хвостовик



Рис. 8. Зона «залечивания» микропор (а) и рыхлоты (б) в материале отливок лопаток турбины после ГИП, $\times 1000$

2. В процессе горячего изостатического прессования при температуре 1210 °С и давлении 160 МПа происходит «залечивание» микропор и рыхлот, не выходящих на поверхность деталей (располагающихся во внутренних объемах металла). Уменьшение размеров и количества микропор в материале лопаток после ГИП способствует стабилизации структуры, а, следовательно, и свойств материала.

3. Модифицирование сплава Ti[Ti(C,N)] приводит к измельчению дендритной структуры (в особенности в перо). При этом уменьшается размер дендритной ячейки, а, следовательно, и расстояние между осями дендритов второго порядка.

4. Микроструктура материалов исследуемых отливок рабочих лопаток ТВ после ГИП соответствует шкале микроструктур, утвержденной ВИАМ. Структуры, характерные для перегретого состояния в материале рабочих лопаток турбины, прошедших операцию ГИП, не выявлены.

5. Термообработка по стандартному режиму (гомогенизация при температуре 1210 °С, 3,5 часа)

после газостатирования способствует повышению структурной однородности сплава и релаксации напряжений, наведенных в процессе ГИП.

Список литературы

1. Каблов Е. Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия) / Каблов Е. Н. – М. : МИСиС. – 2001 – 632 с.
2. Изготовление заготовок рабочих лопаток турбины ГТД из жаропрочных никелевых сплавов на основе применения нанотехнологий / [Замковой В. Е., Качан А. Я., Дудников А. С., Калинина Н.Е. и др.] // Вестник двигателестроения. – 2008. – № 1. – С. 40–46.
3. Влияние горячего изостатического прессования и термообработки на структуру и свойства отливок из жаропрочного никелевого сплава / [Жеманюк П. Д., Клочихин В. В., Лысенко Н. А., Наумик В. В.] // Вестник двигателестроения. – 2013. – № 1. – С. 109–115.

Поступила в редакцию 11.02.2014

Качан О.Я., Лисенко Н.О., Дудніков О.С., Уланов С.О. Якість виливків робочих лопаток турбіни модифікованих наночастинками тугоплавких сполук та оброблених ГПП

Розглянуто вплив наночастинок карбонітриду титану і наступних ГПП та термообробки на якість виливків робочих лопаток турбіни за рахунок підвищення стабілізації структурної однорідності сплаву.

Ключові слова: лопатка, модифікування, гаряче ізостатичне пресування, структурна однорідність, мікроструктура, термообробка, наночастинка, карбонітрид титану.

Kachan A., Lysenko N., Dudnikov A., Ulanov S. Quality of turbine rotor blade castings modified with high-melting compound nanoparticles and processed by hot-isostatic pressing

This paper considers the effect of titanium carbonitride nanoparticles and subsequent hot isostatic pressing and heat treatment on quality of turbine rotor blade castings due to improvement of alloy compositional homogeneity stabilization.

Key words: blade, modification, hot isostatic pressing, compositional homogeneity, microstructure, heat treatment, nanoparticles, titanium carbonitride.