УДК 612

СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛА ЭП800-ВД ЛОПАТКИ РОТОРА ТУРБИНЫ ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ

© Юрий Павлович Тарасенко, Ольга Борисовна Бердник
Нижегородский филиал Учреждения Российской Академии Наук
Института машиноведения имени А.А. Благонравова РАН, Нижний Новгород, Россия
tribonikapc@mail.ru

Аннотация. *Проведено исследование структурно-фазового состояния и механических свойств сплава ЭП800-ВД в постэксплуатационном состоянии и после различных вариантов восстановительной термической обработки.*

Ключевые слова: *рабочие лопатки, жаропрочный никелевый сплав, микроструктура, карбидная фаза, интерметаллидная фаза.*

STRUCTURAL-PHASE CONDITION AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE MATERIAL ЭП800-ВД TURBINE ROTOR BLADES AFTER LONG OPERATION AND RECOVERY HEAT

© Y.P.Tarasenko, O.B. Berdnik

Annotation: *Study structural-phase alloy condition and mechanical properties of ЭП800-ВД State in postèkspluatacionnom and after various options of regenerative heat treating.*

Keywords*: working shoulder-resisting sheet Nickel carbide, microstructure, phase-phase, intermetallidna.*

Введение

Рабочие лопатки ротора турбины работают в жестких условиях совместного воздействия силовых, температурных, структурных напряжений. При длительной эксплуатации в материале лопаток происходят необратимые физико-химические и структурные изменения, которые влияют на их работоспособность и являются результатом протекания процессов ползучести, коррозионной и температурной усталости.

Методика исследования

Объектом исследования являлась рабочая лопатка первой ступени ротора турбины, изготовленная из жаропрочного никелевого сплава ХН65КМВЮБ-ВД (ЭП800-ВД) с наработкой 56950 часов.

Для анализа состояния материала использовали микроструктурный анализ на оптическом микроскопе («НЕОФОТ-32»), растровом электронном микроскопе («VEGA/TESCAN»), измерение микротвердости на приборе (ПМТ-3), испытания механических свойств на растяжение при комнатной температуре (У10Т). По методике Ю.В. Мильмана рассчитали коэффициент пластичности [1]. Суммарное количество интерметаллидной γ’–фазы определяли методом А.А.Глаголева.

Для восстановления материала после эксплуатации, на образцах, вырезанных из лопатки, были опробованы следующие режимы термической обработки:

1. Закалка – нагрев до температуры (1160±10) °С, выдержка 3,0 часа, охлаждение с печью до 950 °С в течение 1 часа, далее охлаждение на воздухе;
2. Закалка – нагрев до (1160±10) °С, выдержка 3 часа, охлаждение на воздухе.

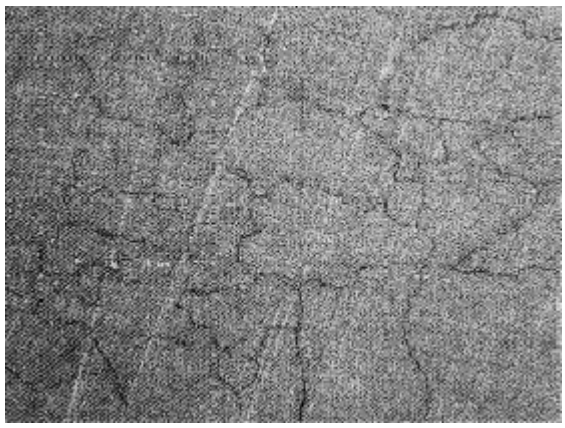
После обоих режимов закалки проводили старение при температуре (850±10) °С в течение: 4; 8; 12 и 16 часов, охлаждение на воздухе.

Результаты работы

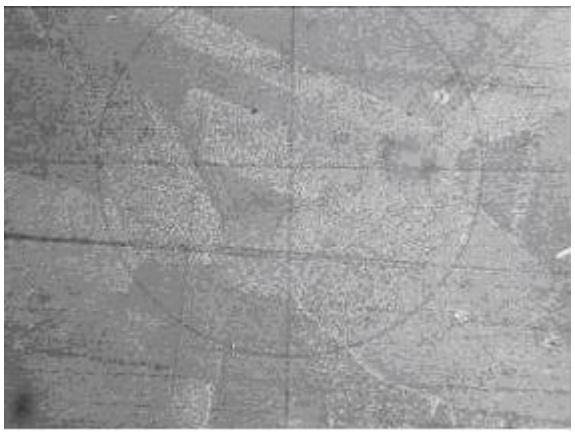
С помощью контрольного химического анализа пробы металла, перовой части лопатки установлен химический состав сплава. Материал лопатки соответствует по хим. составу никелевому сплаву марки ЭП800-ВД (ТУ 14-1-1769-76).

На рисунке 1 представлены фотографии микроструктуры материала после эксплуатации и различных вариантов термообработки. Образцы изготовлены из перовой части лопатки. При микроскопическом исследовании вышеуказанных шлифов, во всех рассматриваемых случаях, не выявлено наличие транс- и интеркристаллитных микротрещин в металле. Материал плотный, установлена значительная разнозернистость никелевого аустенита (γ–фазы). Размер аустенитного зерна материала (D, мкм) в постэксплуатационном состоянии находится в диапазоне от 30 до 190 мкм. После проведения восстановительной термической обработки (ВТО) материала лопатки по предложенным режимам наблюдается изменение размера аустенитного зерна.

При использовании закалки со ступенчатым охлаждением размер зерна, микротвердость, коэффициент пластичности и количество интерметаллидной фазы становятся стабильным уже после 8 часов старения.



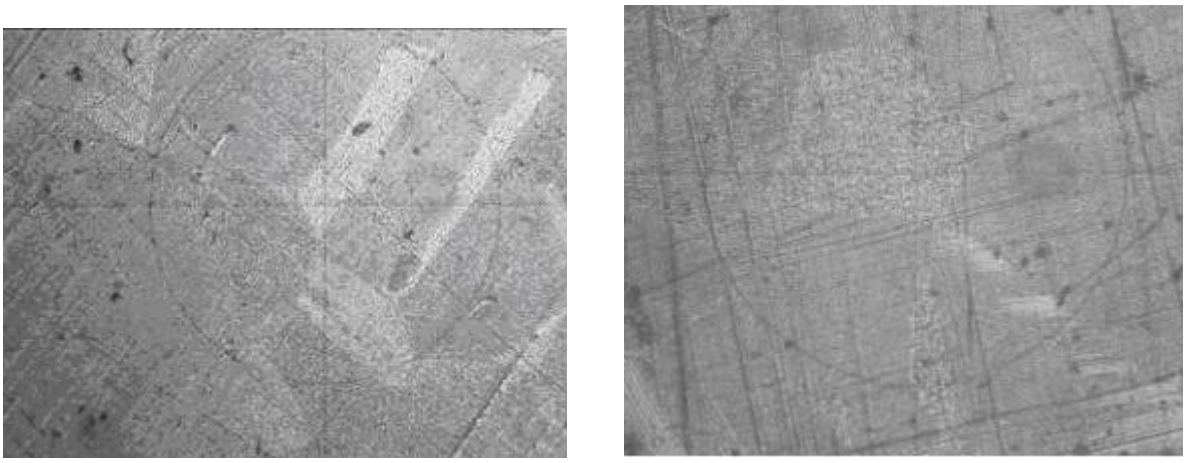
(постэксплуатационное состояние)



(З. 1160 °С, охл. с печью до 950 °С, далее на воздухе +С. 850°С, 12 ч)



(З. 1160 °С, воздух + С.850°С, 12 ч)



(З. 1160 °С, охл. до 950 °С, далее на воздухе + С.850°С, 16 ч)

(З. 1160 °С, воздух + С. 850°С, 16 ч)

Рис. 1 – Микроструктура шлифов, изготовленных из перовой части лопатки, Х250

Из анализа структуры металла лопатки следует, что в результате длительной эксплуатации при рабочих температурах структурно-фазовое состояние лопатки существенно изменяется, деградирует. Упрочняющая интерметаллидная γ’ – фаза имеет хаотичное распределение по объему и неправильную геометрическую форму в виде «звездочек», не до конца скоагулированных объединившихся двух, трех или четырех частиц избыточной фазы. Границы зерен извилистые, имеют кондиционное строение. Карбидная фаза на отдельных участках образует сетку (рисунок 2).

В результате применения ВТО, при закалке с 1160°С, охлаждения с печью до 950 °С, далее на воздухе, уже при кратковременном старении в течение 4 часов выделяется значительное количество избыточной интерметаллидной γ’ – фазы (до 30 %). При этом γ’ – фаза имеет упорядоченную структуру с определенной внутризеренной текстурой и правильную кубическую форму. Размер частиц γ’ – фазы составляет ~ 300 нм. В данном случае границы между аустенитными зернами имеют практически прямолинейное строение с «зубчатыми» берегами. Они заполнены выделениями карбидной фазы шаровидной, эллипсоидной или пластинчатой формы, а также интерметаллидной γ’ – фазы. Расстояние между берегами зерен составляет ~ 560 нм (рисунки 3 а).

В случае использования в качестве ВТО режима закалкой с щхлаждением на воздухе с температуры 1160°С, эффективность восстановления структурного состояния проявляется несколько слабее. При этом, избыточная интерметаллидная γ’ – фаза имеет более грубое строение и более замедлено формируется. Размеры частиц избыточной γ’ – фазы варьируются в диапазоне (400 – 700) нм. Границы аустенитных зерен заполнены карбидной и интерметаллидной фазами, имеют «зубчатые» берега (рисунок 3 б).

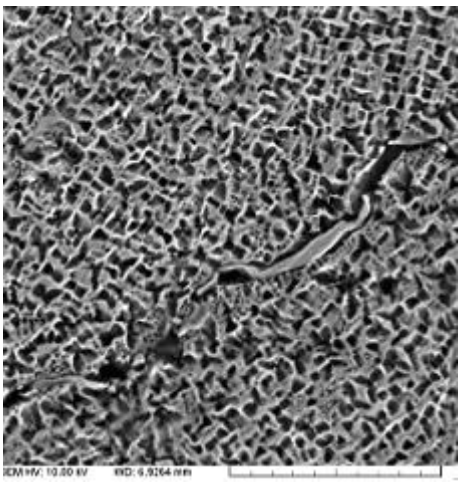
Изменение количества интерметаллидной γ’–фазы (Ni_3Al) в металле образцов, микротвердости ($H_ц$), коэффициента пластичности ($\delta_н$) и размера зерна (D), в зависимости от режима термической обработки приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Изменение количество интерметаллидной фазы, микротвердости и коэффициента пластичности

Вариант термообработки		Микротвердость ($H_μ$), МПа	$δ_н$	Коли-чество γ',%	D, мкм
Состояние	Время старения, ч.				
После эксплуатации 56950 часов		4150 – перо	0,847	35	30-120
		3770 - замок	0,860		
1. Закалка с 1160 °С, охлаждение на воздухе+ Старение при 850°С	---	3420	0,874		30-190
	4	3600	0,867	24	40-240
	8	4000	0,852		
	12	3170	0,883	41	35-210
	16	4140	0,847	30	25-150
2. Закалка с 1160 °С охлаждение с печью до 950 °С, далее охлаждение на воздухе + Старение при 850 °С	---	4500	0,834		50-100
	4	4670	0,828	34	40-220
	8	3670	0,864	40	
	12	3870	0,857	37	25-160
	16	3670	0,864	24	25-160

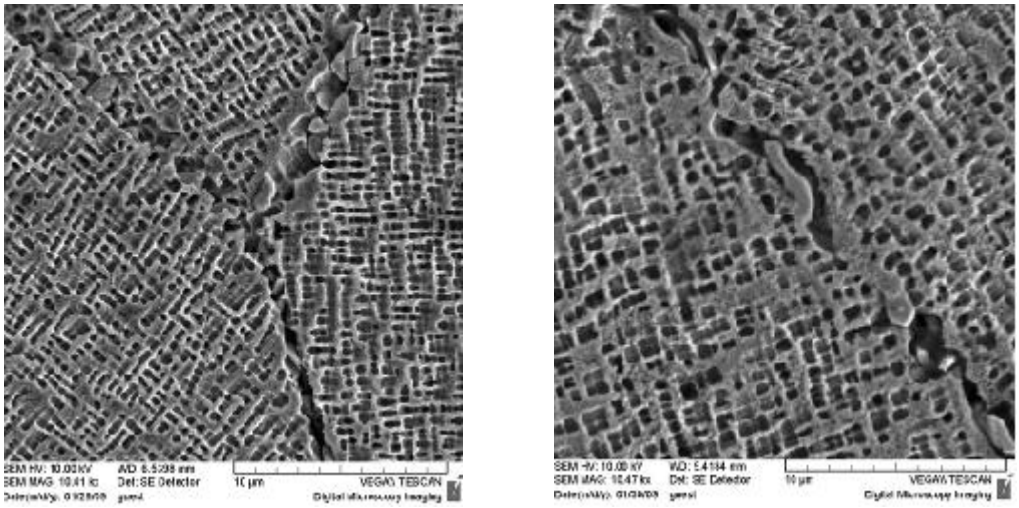
Из таблицы 1 следует, что в первом варианте термообработки, т.е. в случае закалки с температуры 1160 °С наблюдается тенденция повышения твердости материала образцов с увеличением времени выдержки при старении. В случае закалки образцов с температуры 1160 °С и охлаждением с печью до 950 °С, последующим охлаждением на воздухе наблюдается понижение уровня твердости с увеличением времени выдержки при старении, количество избыточной γ'–фазы (Ni_3Al) с увеличением времени старения при термообработке повышается до стабильного уровня (~35 - 40 %) на котором и остается. Коэффициент пластичности повышается ~ до 0,860 и остается стабильным.

Повышение степени гетерогенности металла образцов приводит к понижению их микротвердости ~ до 3800 МПа. Поэтому, в данном случае, γ' – фаза является не упрочняющей фазой, а стабилизирующей состав и повышающей его жаропрочные свойства.



10μm

Рис. 2 – Внутри- и межзеренная структура металла в постэксплуатационном состоянии



а **б**

Рис. 3 – Внутри- и межзеренная структура металла после а - З. 1160 °С, охл. до 950°С с печью, далее на воздухе + С.850°С, 12 ч; б- З. 1160 °С на воздухе + С. 850°С, 12 ч.

Были идентифицированы карбидные выделения, содержащиеся в исследуемом металле. На рисунке 4 наглядно показаны дорожка сканирования электронного пучка и изображение спектра, зафиксированные на указанной поверхности шлифа материала в постэксплуатационном состоянии. Полученная спектрограмма определяет, что исследованное карбидное включение образовано на основе вольфрама и молибдена и соответствует сложному карбиду II группы (W, Mo)C (фаза внедрения). В связи с малым содержанием углерода в данном сплаве (~0,05 %) количество карбидной фазы в нем не значительно и располагается она преимущественно по границам аустенитных зерен.

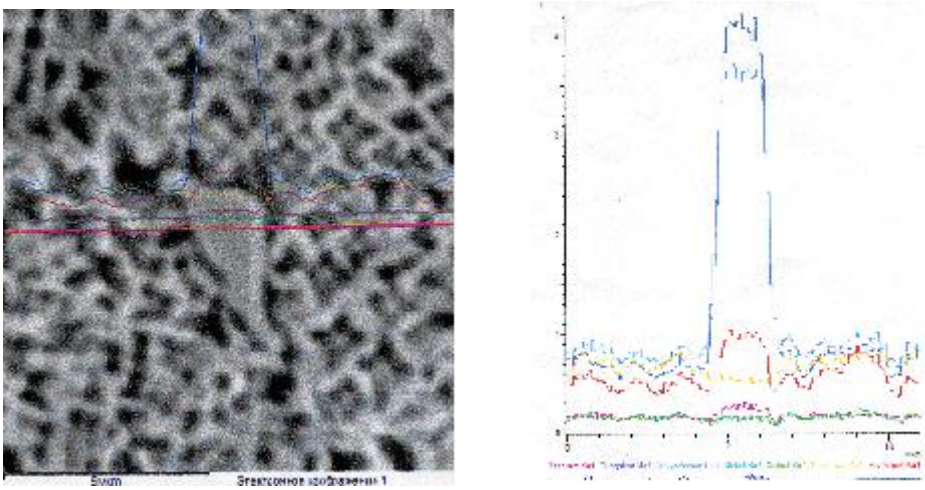


Рис. 4 – Результаты микроспектрального анализа карбидного включения на поверхности шлифа в постэксплуатационном состоянии

В таблице 2 показаны результаты механических испытаний на растяжение плоских образцов в различном состоянии материала. Испытания образцов показали, что механические свойства металла после эксплуатации по всем характеристикам (за исключением предела текучести) не соответствуют требованиям технических условий. Произошло снижение предела прочности в 1,2 раза (с 1078 до 910 МПа), по относительному удлинению в 1,6 раз (с 14 до 8,8 %), по относительному сужению в 2,6 раза (с 15 до 5,8 %).

Применение термической обработки позволило стабилизировать механические свойства материла. Произошло повышение предела прочности и текучести до нормируемых значений.

Таблица 2 - Результаты испытания механических свойств

Состояние материала образца	Предел прочности, ($\sigma_в$),МПа	Предел текучести, ($\sigma_{0,2}$),МПа	Относи-тельное удлинение (δ), %	Относительное сужение (ψ), %
(ТУ 108.02.125-87) ЭП800-ВД	1078	637-784	14	15
Постэксплуатационное состояние	910	720	8,8	5,8
Закалка от 1160 °С охлаждение с печью до 950 °С, далее охлаждение на воздухе + Старение при 850 °С 16 ч	1000	640	19	15
Закалка с 1160 °С, охлаждение на воздухе + Старение при 850 °С 16 ч	1080	620	16	17

Заключение

На основании комплексного исследования рабочей лопатки 1 ступени ротора турбины, имеющей наработку 56950 часов, установлено, что:

- Материал лопатки по химическому составу соответствует жаропрочному никелевому сплаву ХН65КМВЮБ (ЭП 800-ВД);
- В процессе эксплуатации произошла деградация структуры материала, что привело к снижению механических показателей. Для восстановления работоспособности лопаток, необходимо применение восстановительной термической обработки.
- Термическая обработка материала лопаток по режиму – закалка с 1160 °С охлаждение в печи до 950 °С + старение при 850 °С в течение 12 часов позволяет регенерировать структурно-фазовое состояние металла, а также некондиционные показатели его механических свойств.

Литература

1.Мильман Ю.В., Голанов Б.А., Чугунова С.И. Характеристика пластичности, получаемая при измерении твердости. Киев, 1992, 25 с.
2. Захаров М.В., Захаров А.М. Жаропрочные сплавы. – М.: Металлургия, 1972,-348с.
3 Рыбников А.И., Гецов Л.Б. Термическая обработка лопаток с покрытиями. // МиТОМ, 1995.№ 9. С.21-25.

Поступила: 25.05.11.