

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621

С.В. Кириков, О.Б. Бердник, И.Н. Царёва

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МАТЕРИАЛА РАБОЧИХ ЛОПАТОК ИЗ СПЛАВА ЭП800ВД МЕТОДАМИ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОЙ ФАЗЫ

Институт проблем машиностроения РАН (г. Нижний Новгород)

Проведен комплексный анализ состояния материала рабочей лопатки из сплава ЭП800ВД после эксплуатации и восстановительной термической обработки. Установлено, что деградация механических свойств материала связана с процессами коагуляции и растворения упрочняющей интерметаллидной фазы. Показано, что своевременная восстановительная термическая обработка приводит к перераспределению частиц упрочняющих фаз и выравниванию их размеров, что, в свою очередь, благоприятно влияет на механические свойства материала.

Ключевые слова: лопатки турбин, жаропрочный никелевый сплав, легирующие элементы, интерметаллидная фаза, механические свойства, релаксация.

Введение

Рабочие лопатки 1-й ступени из сплава ЭП800ВД ротора турбины агрегата ГТЭ-45-3 работают в жестких условиях совместного воздействия на них высоких температур в газовой среде (~ 800°C) и рабочих напряжений (~100 МПа) [1].

Согласно регламенту, разработанному изготовителем, назначенный ресурс работы стационарных газотурбинных установок (ГТУ) – 100 000 часов. Для базовых деталей, к которым относятся рабочие лопатки турбин, срок службы составляет не менее ресурса между капитальными ремонтами или кратный ему, следовательно, не менее 25 000 ч [2].

При техническом осмотре в процессе эксплуатации (14 000 ч) на рабочих лопатках 1-й ступени были выявлены разрушения выходной кромки. Этот дефект характерен для данного типа лопаток, так как выходная кромка является наиболее нагруженной из-за одновременного воздействия высоких температур и газового потока, но это, как правило, должно проявляться на более поздних сроках эксплуатации.

Так как исследуемые лопатки не отработали назначенный ресурс, то для установления причин их разрушения был проведен анализ структурного состояния материала и рассмотрены возможные варианты восстановления его работоспособности.

Целью работы являлась количественная оценка параметров микроструктуры сплава в разных термонагруженных зонах лопатки для установления работоспособности материала (для определения возможности регенерации структуры и ремонтпригодности).

Методика исследований

Рабочие лопатки 1-й ступени ротора турбины ГТЭ-45-3 изготавливают методом горячей штамповки из жаропрочного никелевого сплава ЭП800ВД (ХН65КМВЮБ), имеющего следующий химический состав (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав сплава ЭП800ВД

C	S	Mn	Cr	Co	Mo	W	Al	Fe	Nb	Ni
0,05	0,4	0,5	13,5	10,5	6,0	6,0	4,9	3,0	2,0	осн

Средняя объёмная доля интерметаллидной фазы в сплаве составляет ~ 40 % и может варьироваться в зависимости от состояния материала на разных стадиях наработки. Сплав ЭП800ВД выплавляют в открытых индукционных печах с последующим вакуумно-дуговым переплавом. Физические свойства сплава ЭП800ВД представлены в табл. 2.

Таблица 2

Физические свойства сплава ЭП800ВД

Температура испытания, °С	20	500	700	800
Модуль нормальной упругости E, ГПа	230	190	174	165
Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°С)	12,7	17,2	23,6	27,2
Коэффициент линейного расширения (α , $10^{-6} 1/°С$)	-	13,0	14,0	14,3
Плотность ρ , кг/м ³	$8,8 \cdot 10^{-3}$	-	-	-

Микроскопический анализ проводили с помощью оптического микроскопа «Неофот-32» и растрового электронного микроскопа «TESCAN VEGA II» на шлифах, изготовленных из перовой и замковой частей лопатки. Геометрические характеристики фаз рассчитывали с помощью программного обеспечения Good_Phase.

Твердость (HV) материала лопатки в различных зонах измеряли ультразвуковым твердомером МЕТ-У1. Микротвердость измеряли на шлифах на микротвердомере ПМТ-3 по ГОСТ 9450-76 при нагрузке на индентор 2Н.

Механические испытания на ползучесть проводили на машине АТС. Сравнительный анализ результатов испытаний ползучести сплава ЭП800ВД к предъявляемым требованиям по данному показателю в соответствии с ТУ 108.02.125-87 ($\sigma_{дл}=392$ МПа при времени до разрушения образца $\tau > 100$ ч и температуре испытания 800 °С) проводили с помощью уравнения Ларсена-Миллера (1) [5].

$$T1(C + \lg \tau1) = T2(C + \lg \tau2). \quad (1)$$

Результаты исследований

При визуально-оптическом осмотре выявлено локальное деформирование реборды со стороны входной кромки (рис. 1) и скол (высотой 33 мм, глубиной 10 мм) металла на выходной кромке перовой части лопатки. На рис. 1 видна сетка трещин, распространяющихся от зоны дефекта к центру пера лопатки. Установлено, что излом материала - крупнозернистый (камневидный) (рис. 2). Поверхность излома равномерно окислена, цветов побежалости не наблюдается. Поверхность перовой части со стороны «корыта» вблизи зоны разрушения более шероховатая.

Измерения твердости (HV) в разных зонах лопатки показали, что вблизи поврежденной зоны материал находится в упрочненном состоянии. После разрушения выходной кромки перовой части (предположительно в результате ударного воздействия) в зоне дефекта произошло образование сетки трещин. После зарождения трещины ее вершина становится острым концентратором напряжений, вследствие чего в этой зоне происходит пластическая деформация, которая вызывает деформационное упрочнение материала и, как следствие,

снижение его пластических свойств [4]. Также были проведены измерения микротвердости на микрошлифах, вырезанных из трех зон: вблизи области разрушения на выходной кромке перовой части, из противоположного края (входная кромка) и из замковой части. Результаты измерений представлены в табл. 3. Твердость материала вокруг поврежденной зоны в 1,6 раз выше по сравнению с твердостью материала центральной зоны перовой и замковой частей.

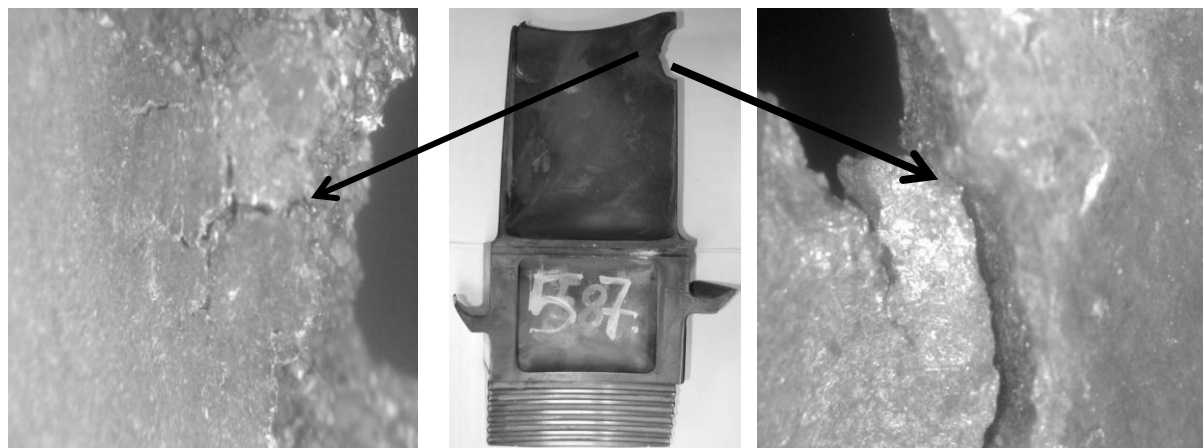


Рис. 1. Внешний вид рабочей лопатки из сплава ЭП800ВД после эксплуатации

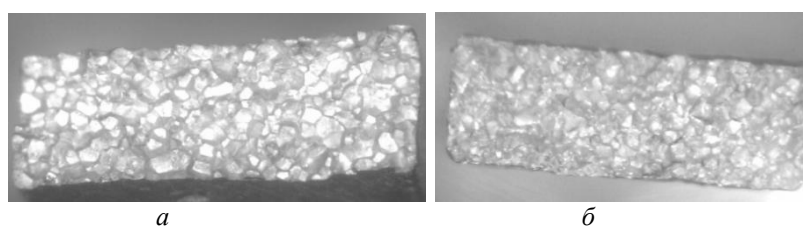


Рис. 2. Вид излома образцов:
a – образец из перовой части; *б* – образец из замковой части

Таблица 3

Результаты измерений твердости и микротвердости в разных зонах лопатки

Зона измерения	Твердость HV, ГПа	Микротвердость H _μ , ГПа
Выходная кромка вблизи дефекта	5,86	4,65 – 4,85
Центральная зона перовой части	3,22 («спинка») 3,53 («корыто»)	3,80
Замковая часть	3,60	3,53

Исследования структуры сплава были проведены в трех зонах: 1 - выходная кромка перовой части вблизи поврежденной зоны; 2 – центральная зона перовой части лопатки; 3 - замковая часть лопатки. Фотографии микроструктуры представлены на рис. 3.

Анализ микроструктуры сплава во всех зонах показал, что материал - плотный, дефектов в виде пор и микротрещин не обнаружено. Границы γ -зерен - ровные, четкие и упрочнены выделениями карбидных фаз. Размер карбидных включений - до 1 мкм. На микроструктуре сплава с выходной кромки перовой части лопатки (рис. 3, *a*) наблюдается довыделение упрочняющей интерметаллидной фазы, среднее значение объемной доли которой составляет 49 %, а в некоторых полях зрения, непосредственно вблизи дефекта, её значение может достигать 60 %. Средний размер интерметаллидных включений в этой зоне равен 0,43 мкм (минимальное значение – 0,25 мкм, максимальное – 0,75 мкм). В зоне, расположенной

ближе к входной кромке (рис. 3, б), содержание интерметаллидной фазы составляет 40 %. Среднее значение размера интерметаллидных включений в этой зоне составляет 0,35 мкм (минимальное значение – 0,20 мкм, максимальное – 0,55 мкм). Количество упрочняющей интерметаллидной фазы в замковой части ~ 35 % (рис. 3, в). Среднее значение размера интерметаллидных включений в этой зоне составляет 0,28 мкм (минимальное значение – 0,14 мкм, максимальное – 0,44 мкм).

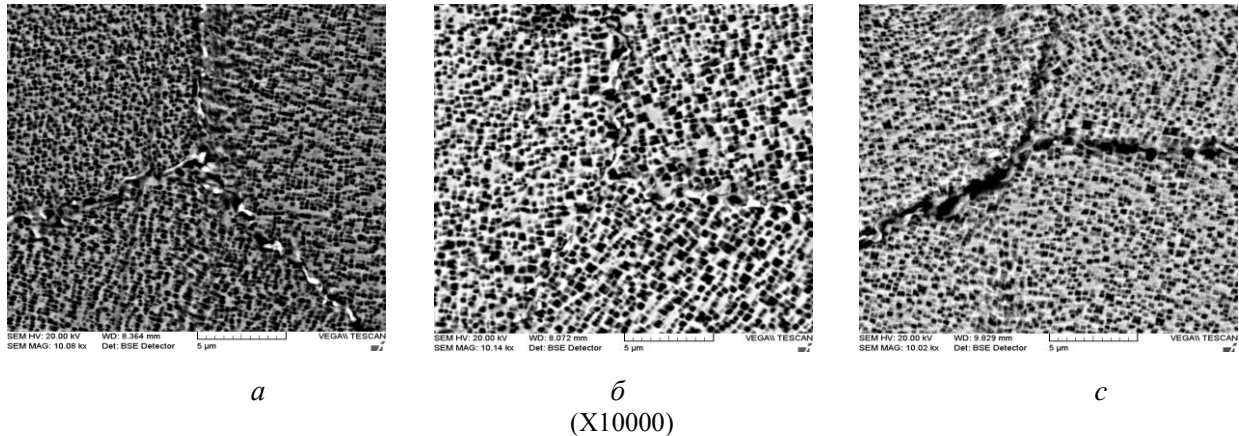


Рис. 3. Микроструктура сплава ЭП800-ВД:
а – выходной кромки перовой части вблизи поврежденной зоны;
б – центральной зоны перовой части лопатки; с – замковой части лопатки

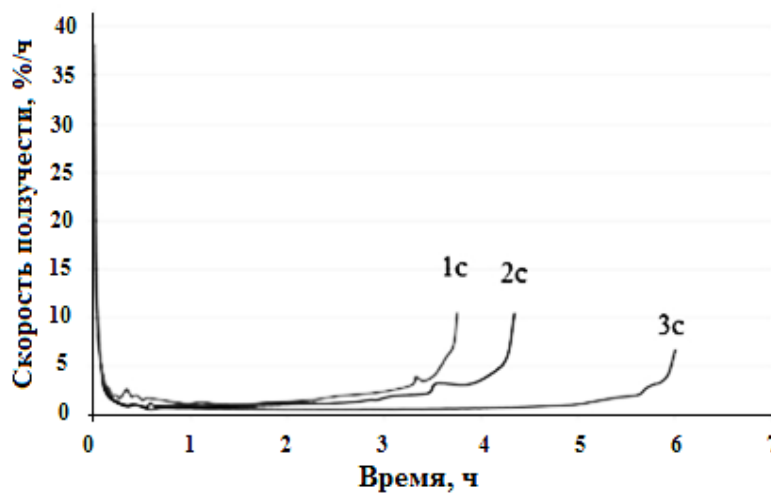


Рис. 4. Зависимость скорости ползучести от времени образцов из сплава ЭП800ВД:
1с и 2с – образцы из перовой части вблизи дефекта; 3с – образец из центральной зоны перовой части

По результатам проведенных испытаний на ползучесть образцы 1с и 2с, вырезанные из выходной кромки, разрушились после 3,8 ч (73,2 ч (пересчет по Ларсену-Миллеру -) и 4,3 ч (83,7 ч) соответственно, что ниже нормируемого значения - 5 ч (не менее 100 ч). Образец 3с, вырезанный из середины перовой части, выдержал до разрушения 6 ч (119,3 ч), что соответствует требованиям ТУ на данный сплав. По кривым ползучести были построены зависимости скорости ползучести от времени (рис. 4). Из графиков видно, что стадия установившейся ползучести на кривых для образцов 1с и 2с (вырезанных из перовой части вблизи поврежденной зоны) менее выражена, чем на кривой для образца 3с (середины перовой части) и составляет ~ 50 % от общего времени, против ~ 85 % для образца 3с. Можно предположить, что деградация структуры, проявляющаяся в увеличении неоднородности кон-

центрации и размера интерметаллидной фазы, в образцах 1с и 2с на стадии деформационного упрочнения (первая стадия старения) происходит более интенсивно, чем в образце 3с.

Для получения более однородного характера распределения упрочняющих фаз в перовой части рабочей лопатки на образцах, вырезанных из разных зон, была проведена восстановительная термическая обработка: ступенчатая закалка с температур 1160 °С и 950°С с последующим старением при 850 °С.

Анализ микроструктуры показал, что после термообработки произошло частичное растворение интерметаллидной фазы по всему объему лопатки, уменьшился разброс размеров частиц γ' -фазы. Наиболее значительное снижение микротвердости произошло на образце, вырезанном из выходной кромки (с 4,85 до 3,95 ГПа). Сравнение результатов анализа микроструктуры, микротвердости материала из разных зон после эксплуатации и после проведения восстановительной термообработки приведены в табл. 4.

Таблица 4

Сравнение основных характеристик микроструктуры и механических свойств сплава ЭП800ВД в разных зонах рабочей лопатки 1-й ступени

Зона анализа	После эксплуатации				После ВТО			
	Размер γ' -фазы (разброс), мкм	Количество частиц на 100 мкм ²	Объемная доля γ' -фазы, %	H _ц , ГПа	Размер γ' -фазы, мкм	Количество частиц на 100 мкм ²	Объемная доля γ' -фазы, %	H _ц , ГПа
Выходная кромка (перовая часть)	0,43 (0,25-0,75)	390	49	4,7	0,47 (0,42-0,55)	320	44	3,7
Центральная зона перовой части	0,35 (0,20-0,55)	430	40	3,8	0,35 (0,34-0,37)	340	31	3,6
Замковая часть	0,28 (0,14-0,44)	440	35	3,5	0,34 (0,32-0,37)	320	28	3,5

Выводы

1. На основании результатов комплексного анализа постэксплуатационного состояния лопатки из сплава ЭП800ВД обнаружены изменения в микроструктуре материала вблизи дефекта на выходной кромке перовой части, проявляющиеся в увеличении размера частиц интерметаллидной фазы и обусловленные высокими термомеханическими нагрузками при эксплуатации.

2. По результатам испытаний на ползучесть установлено, что значение времени ползучести (τ) материала вблизи дефекта в 1,3 раза ниже минимально допустимого уровня для данного сплава. Данный факт может быть обусловлен неоднородным распределением скоплений частиц интерметаллидной γ' -фазы.

3. Материал средней части пера имеет кондиционную микроструктуру и показатели механических свойств, соответствующие требованиям ТУ на данный сплав.

4. Восстановительная термообработка приводит к перераспределению упрочняющих фаз и выравниванию размеров частиц. При этом сохраняется неоднородность концентрации γ' -фазы по телу лопатки. Данный факт свидетельствует о необходимости своевременного от-

слеживания стадии эксплуатации изделия, когда проведение восстановительной термообработки целесообразно, пока процессы деградации не приобрели необратимый характер.

5. Рабочая лопатка 1-й ступени ГТЭ-45-3 с фактической наработкой 14 000 ч имеет недопустимый для дальнейшей эксплуатации характер повреждений материала на выходной кромке пера, и дальнейшая эксплуатация данной детали невозможна.

Библиографический список

1. Марочник сталей и сплавов / А.С. Зубченко [и др.]. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.
2. **Москвитин, В.В.** Пластичность при переменных нагружениях / В.В. Москвитин. – М.: МГУ, 1965. – 203 с.
3. Теория ползучести и длительной прочности металлов / И.А. Одинг [и др.]. – М.: Metallurgia, 1959. – 270 с.

*Дата поступления
в редакцию 19.01.2016*

S.V. Kirikov, O.B. Berdnik, I.N. Tsareva

DETERMINING THE HEALTH OF THE ALLOY MATERIAL OF ROTOR BLADES EP800VD METHODS OF QUANTITATIVE EVALUATION OF MORPHOLOGICAL PARAMETERS OF INTERMETALLIC PHASES

Institute of problems of mechanical engineering Russian Academy of Sciences
(Nizhny Novgorod)

The complex analysis of a material condition of the working shovel from EP800VD alloy after operation and the reduction heat treatment is carried out. It is established that degradation of mechanical characteristics of material is bound to processes of coagulation and dissolution of the strengthening intermetallic phase. It is shown that the well-timed reduction heat treatment leads to redistribution of particles of the strengthening phases and alignment of their sizes that in turn, favorably influences mechanical characteristics of material.

Key words: shovels of turbines, high-temperature nickel alloy, alloying elements, intermetallic phase, mechanical characteristics, relaxation.