

АНАЛИЗ ТЕРМОНАГРУЖЕННЫХ ЗОН РАБОЧИХ ЛОПАТОК ИЗ НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА С РАЗЛИЧНОЙ НАРАБОТКИ

**Царева И.Н., Бердник О.Б., Кириков С.В., Кривина Л.А.,
Тарасенко Ю.П.**

*Институт проблем машиностроения (ИПМ РАН), Нижний Новгород, Россия,
npktribinika@yandex.ru*

Рабочие лопатки находятся под действием центробежных сил, создающих в них переменные по высоте профиля напряжения, максимум которых находится в основании перовой части. Они имеют температуру переменную по высоте и сечению, величина градиентов температур зависит от параметров потока и геометрических размеров лопаток. Для деталей газотурбинных установок, работающих при повышенных температурах (800 - 850 °С), применяются жаропрочные сплавы, при выборе которых необходимо учитывать специфику их напряженного состояния и особенности эксплуатации турбины.

При изготовлении и контроле качества готовых рабочих лопаток завод-изготовитель пользуется общепринятыми ГОСТами и Техническими условиями (ТУ) для определения работоспособности при длительной эксплуатации. Если при изготовлении новых изделий, предполагается, что материал должен быть однороден по всему объему детали, и при определении сдаточных механических характеристик предприятие-изготовитель предлагает анализировать преимущественно замковую часть лопатки. Сами образцы велики и при их испытаниях возможно получить лишь усредненные данные о состоянии материала. Рабочая часть разрывного образца, как правило (согласно схеме разрезки регламентированной в ТУ) не затрагивает наиболее нагруженные зоны лопатки (перовую часть). Применение данного подхода неприемлемо для лопаток, отработавших назначенный ресурс. Назначение повторного ресурса после проведения исследований по требованиям ТУ может привести к ошибочно завышенным срокам повторной эксплуатации, т.к. при данном подходе учитывается только состояние внутренних зон материала (или вообще замковой части), а разрушение, как известно, происходит с поверхности и в более термонагруженных частях (входная и выходная кромки перовой части), которые при данном подходе не рассматриваются.

Результаты

Для анализа материала были выбраны две рабочие лопатки: №1 – с наработкой 12 000 часов (не отработавшая назначенный заводом-изготовителем ресурс (50 000 часов)) и № 2 – 63 000 часов. Обе из жаропрочного никелевого сплава марки ЭП800-ВД (ХН65КМВЮБ-ВД) [1,2]. При рассмотрении возможности дальнейшей эксплуатации лопаток, необходимо провести комплексное исследование материала, в ТУ [3] приведена схема разрезки, где механические характеристики сплава при комнатной температуре определяются на образцах, вырезанных из замковой части. Для анализа материала после эксплуатации, данный подход нецелесообразен, так как наибольшему температурному воздействию подвержена перовая часть лопатки, поэтому были изготовлены образцы из перовой части для кратковременных испытаний на растяжение (тип III по ГОСТ 1497). Результаты механических испытаний представлены в табл.1. По результатам полученных значений (табл. 1), материал обеих лопаток кондиционный и изделия еще работоспособно.

Для детального анализа были проведены релаксационные испытания [4] и анализ микроструктуры. Исследования проведены на образцах, вырезанных из выходной, входной кромок и замковой части лопаток. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 1 - Результаты механических испытаний образцов из перовой части лопаток

Объект исследования	Предел прочности σ_B , МПа	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение, δ , %	Относительное сужение, ψ , %
ТУ	≥ 1078	637-784	≥ 14	≥ 15
Лопатка №1	1120	650	23	20
Лопатка №2	1200	670	15	15

Таблица 2 - Механические характеристики, полученные из релаксационных испытаний

Лопатка, наработка	Место анализа	σ_0 , МПа	Среднее значение σ_0 , МПа	σ_T , МПа	Среднее значение σ_T , МПа	σ_0/σ_T
№1 12 000 часов	перовая часть: выходная кромка	370	360	750	733	0,49
		350		715		0,48
	перовая часть: входная кромка	350	350	770	773	0,45
		350		775		0,45
	замковая часть	260	280	695	685	0,37
		300		675		0,45
№2 63 000 часов	перовая часть, выходная кромка	340	343	750	690	0,45
		430		670		0,64
		260		650		0,40
	перовая часть, входная кромка	320	367	620	630	0,50
		450		630		0,70
		330		640		0,50
	замковая часть	430	403	700	703	0,60
		420		710		0,60
		360		700		0,50

Из полученных данных видно, что для материала с меньшей наработкой значения предела текучести для всех зон (от 685 до 773 МПа) соответствует требованиям на сплав. Для материала с наработкой 63 000 часов предел текучести материала выходной кромки $\sigma_T = 630$ МПа, что не соответствует норме.

Анализ предела микропластичности (σ_0) показал, что для материала с наработкой 12 000 часов значения σ_0 находятся на одном уровне (для перовой части $\sigma_0 = 350$ МПа, для замковой части $\sigma_0 = 280$ МПа). Различия в значениях микропластичности для перовой и замковой частей может отражать изменения в микроструктуре, довыделения упрочняющей фазы. Соотношение σ_0/σ_T для всех зон лопатки №1 находится на уровне 0,40 - 0,49. Для материала с наработкой 63 000 часов полученные соотношения характеристик имеют разброс от 0,49 до 0,58. Сравнивая полученные данные из кривых релаксационных испытаний, получаем, что результаты образца из лопатки №2, вырезанного около конца трещины имеют наименьшее значение предела микропластичности $\sigma_0 = 260$ МПа, при удовлетворительном значении предела текучести $\sigma_T = 650$ МПа. Значения предела микропластичности имеют разброс от 320 до 450 МПа. Это связано с неоднородностью микроструктуры и деформационным упрочнением сплава в отдельных микроучастках.

Проведенные исследования микроструктуры образцов, вырезанных из лопаток с разными наработками показали, что в материале выходной кромки перовой части процессы старения во время эксплуатации происходят интенсивнее, так как она является наиболее нагруженной. Воздействие высокотемпературного потока приводит к изменениям в микроструктуре: изменению размеров и перераспределению

упрочняющих карбидных и интерметаллидных фаз, что влияет на показатели прочностных и пластических характеристик материала данных зон, а именно снижение всех механических показателей.

При сравнении микроструктуры разных зон лопатки №2 установлен идентичный характер распределения упрочняющих фаз в структуре основного материала. В никелевой матрице основного материала пера лопатки наблюдается равномерные выделения интерметаллидной фазы кубической формы с четкими границами и плотной упаковки размером 0,5 мкм.

В микроструктуре образца, вырезанного из перовой области вблизи прикорневой зоны, выявлено скопление карбидной фазы разной дисперсности на границах зерен. Для тонкой структуры металла пера характерно небольшое увеличение размеров крупных частиц γ' – фазы и потеря их четкой огранки. Наблюдается их частичное слияние. Размер упрочняющей интерметаллидной фазы в основном материале перовой и замковой частей лопатки ~ до 0,5 мкм, карбидов ~ до 3 мкм. В структуре материала замковой части обнаружены выделения как первичных (крупных) карбидов, так и вторичных (мелких) карбидов [5].

Выводы

Проведенные исследования материала лопаток при разных сроках эксплуатации подтвердили, что подход к оценке технического состояния комплекта и каждой лопатки должен быть индивидуальным, с локальным анализом термонагруженных зон с применением электронно-микроскопических исследований и механических испытаний на микрообразцах.

Необходимо заводам–изготовителям и эксплуатационным организациям более тесно сотрудничать с НИИ и вводить новые современные методы контроля на всех стадиях изготовления и эксплуатации ответственных деталей.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН на проведение фундаментальных научных исследований на 2013-2020 гг. по теме № 0035-2014-0401 (№ госрегистрации 01201458049)

Список литературы

1. Тарасенко Ю.П. Структура и механические лопатки 1 ступени ротора турбины ГТЭ-45-3 после длительной наработки и регенерации / Ю.П.Тарасенко, В.А.Сорокин, О.Б.Бердник // Вестник Самарского Государственного Аэрокосмического Университета.– Самара, 2009, № 3(19). С.110-117.
2. Тарасенко Ю.П., Бердник О.Б. Структурно-фазовое состояние и механические свойства материала ЭП800-ВД лопатки ротора турбины после длительной эксплуатации и восстановительной термообработки. / Ю.П.Тарасенко, О.Б.Бердник // Интернет журнал «Вестник научно-технического развития», №7(47), 2011 г. С.17-22 www.vntr.ru номер гос. регистрации 0421100120/0029.
3. ТУ 108.02.125-87 Заготовки рабочих лопаток штампованные из сплавов марок ХН65КМВЮБ-ВД (ЭП-800ВД), ХН80ТБ (ЭИ607А).
4. Релаксация напряжений в металлах и сплавах / В.А.Скуднов, М.К.Чегуров // - Н.Новгород: метод. пособие. НГТУ, 2010, - 30с.
5. Кириков С.В. Определение работоспособности материала рабочих лопаток из сплава ЭП800ВД методами количественной оценки морфологических параметров интерметаллидной фазы / С.В Кириков, О.Б. Бердник, И.Н. Царева // Труды НГТУ им. Р.Е.Алексеева. – Нижний Новгород, 2016, №1(116), С. 135 -140.