УДК 612

О ПРИЧИНАХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ТРЕЩИНЫ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ПЕРОВОЙ ЧАСТИ РАБОЧИХ ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК

© Юрий Павлович Тарасенко, Ольга Борисовна Бердник,

Ирина Николаевна Царева, Михаил Константинович Чегуров *

Нижегородский филиал Учреждения Российской Академии Наук Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Нижегородский Технический Университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия,
tribonika@mail.ru

Аннотация. *В работе были исследованы рабочие лопатки 1 ступени турбины из сплава ЭП800-ВД (ХН65КМВЮБ). Данные лопатки отработали ресурс (62776 часов). Комплект был введен в эксплуатацию на второй срок после капитального ремонта. В результате технического контроля после 1300 часов были отбракованы две рабочие лопатки 1 ступени с трещинами в зоне наплавки. Проведено исследование для установления причин трещинообразования.*

Ключевые слова: *лопатки турбины, жаропрочные сплавы, релаксационные испытания, предела микропластичности, предел текучести, микроструктура.*

ON THE CAUSES OF CRACKS IN THE OPERATION OF THE FIRST PART OF THE WORK OF TURBINE BLADES

Y.P. Tarasenko, O.B. Berdnik, I.N. Tsareva, M.K.Chegurov

Annotation*: In the work were studied working 1-stage turbine blades of the alloy ÈP800-WA (HN65KMVÛB). These blades have resource (62776 hours). The kit was commissioned for a second term after renovation. As a result of technical control after 1300 hours were culled two working shoulder 1 stage with cracks in the zone of surfacing. A study to identify the causes of crack exposed.*

Keywords: *blade turbines, heat-resistant alloys, relaxation tests mikroplastičnosti limit, yield, microstructure.*

Введение

В работе были исследованы две рабочие лопатки 1 ступени турбины из сплава ЭП800-ВД (ХН65КМВЮБ-ВД). Данные лопатки отработали ресурс (62776 часов). Комплект был введен в эксплуатацию на второй срок после проведения капитального ремонта. Через 1300 часов агрегат был остановлен на профилактический осмотр. В результате технического контроля были отбракованы две рабочие лопатки 1 ступени с трещинами в наплавленной зоне. Данные лопатки исследованы для установления причин трещинообразования.

Методика исследования

Для анализа причин образования трещин в наплавленной части лопаток были проведены исследование микроструктуры, рентгенофазовый анализ и релаксационные испытания. Из лопатки были изготовлены 12 цилиндрических образцов (d = 3 мм, h = 6 мм). Торцы образцов плоскопараллельны и перпендикулярны оси. Шероховатость боковой поверхности не должна превышать 1,25 мкм. Вырезку производили согласно схеме разрезки, представленной на рисунке 1. Заготовка 1 (1 – зона около трещины; 2 – зона основного материала ЭП800-ВД без

дефектов). Заготовка 2 (зона 3 - наплавленный материал ЭП648 (ХН50ВМТЮБ); зона 4 - замковая часть лопатки).

На одном образце из каждой зоны были проведены микроструктурные исследования на оптическом микроскопе «НЕОФОТ 32» и электронном микроскопе VEGA/NESCAN. Фазовый состав и микродеформации исследовали методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре «Дрон-3М» с применением Cu-$К_{\alpha}$-излучения в традиционной геометрии (по Бреггу-Брентано).

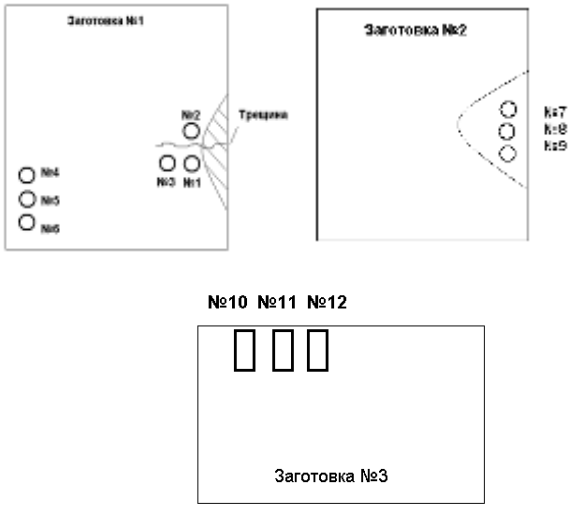


Рис. 1 - Схема вырезки цилиндрических образцов из заготовок лопаток

Испытания на релаксацию напряжений проводили на оригинальной автоматизированной установке высокой жесткости «Релаксометр» с использованием программного обеспечения АУР1. *Процедура испытания*. Образцы подвергаются деформации сжатием. Осуществляется ступенчатое увеличение нагрузки с постоянным приращением напряжения (или деформации) на каждом шаге (шаг нагружения σ = 20 МПа). После каждого шага сжатия нагружение приостанавливается на время $\Delta t = 120$ *с*. Затем осуществляется следующий шаг. После каждого шага сжатия при остановке нагружения наблюдается падение напряжения. Это обусловлено релаксацией. Явление релаксации отражает процессы аккомодационной перестройки дефектной (дислокационной) структуры материала под действием внешних и внутренних напряжений. В ходе испытания программа АУР1 в автоматическом режиме регистрирует нагружения при каждом шаге, максимальную величину падения напряжения за время $\Delta t = 120$ *с*, а также глубину релаксации $\Delta\sigma$ и выводит отчет в формате Microsoft Excel [1].

Результаты исследования

Рабочие лопатки 1 ступени ротора турбины изготавливают методом горячей штамповки из жаропрочного никелевого сплава ЭП800-ВД (ХН65КМВЮБ), имеющего следующий химический состав: C ≤ 0,05%; S ≤ 0,4 %; Mn ≤ 0,5 %; Cr=(12,5– 13,5) %; Co=(8,5 – 10,5) %; Mo= (5,0 – 6,0) %; W= (4,0 – 6,0) %; Al=(4,2 – 4,9) %; Nb=(1,5 – 2,0) %; Fe ≤ 3 %; Ni – основа [2].

При визуальном осмотре рабочих лопаток из сплава ЭП800-ВД на перовой части в зоне наплавки были зафиксированы трещины. Трещины распространяются из наплавленного материала через зону термического влияния в основной материал. Сквозная трещина имеет

протяженность ~ 27 мм. Внешний вид рабочих лопаток 1 ступени из сплава ЭП800-ВД с дефектами на перовой части в зоне наплавленного материала представлен на рисунке 2.

Фото микроструктуры образцов представлены на рисунках 3 - 6. Анализ микроструктуры показал, что основной материал лопатки находится в удовлетворительном состоянии, микротрещин не наблюдается. Материал -плотный, границы зерен - четкие, упрочнены выделениями карбидной фазы. Карбиды имеют правильную округлую форму, не образуя сетки. Микрозерна металла имеют практически равноосное строение. Признаков образования игольчатых фаз не обнаружено. При сравнении микроструктуры четырех образцов установлен идентичный характер распределения упрочняющих фаз в структуре основного материала. В никелевой матрице основного материала пера лопатки наблюдаются равномерные выделения интерметаллидной фазы кубической формы с четкими границами и плотной упаковки размером 0,5 мкм (рисунок 3).

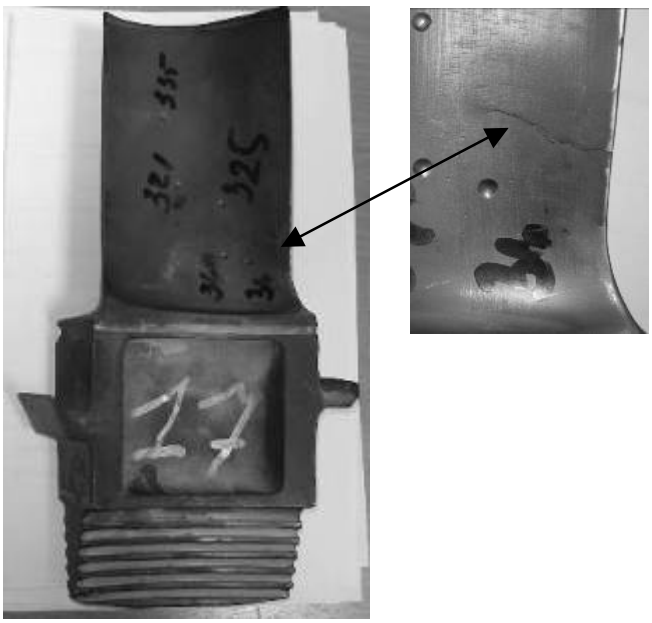
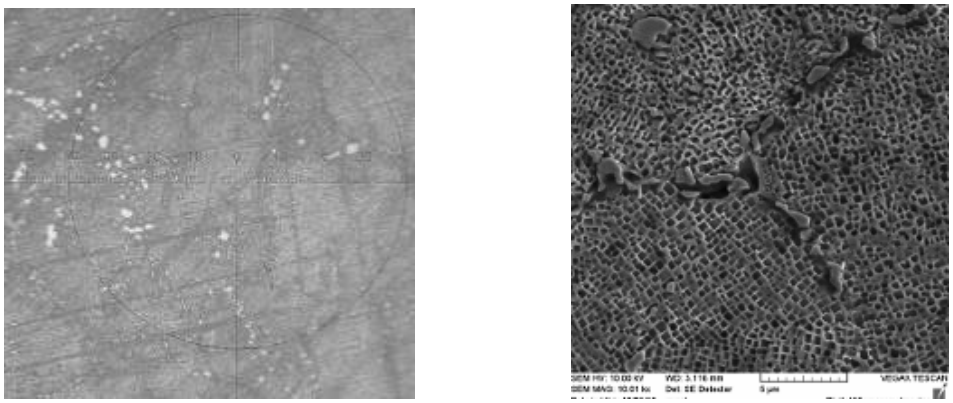


Рис. 2 – Вид дефектов перовой части рабочей лопатки 1 ступени (сквозная трещина в зоне наплавленного материала)

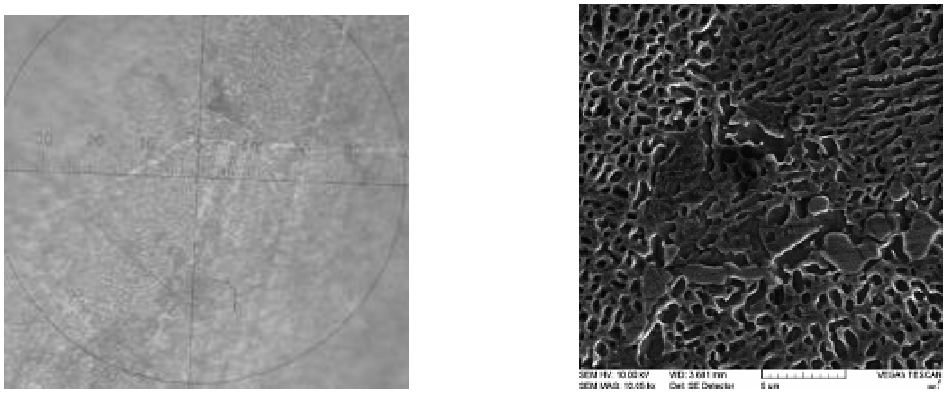
В микроструктуре образца, вырезанного из перовой области вблизи прикорневой зоны, выявлено скопление карбидной фазы разной дисперсности на границах зерен. Для тонкой структуры металла пера характерно небольшое увеличение размеров крупных частиц γ’ – фазы и потеря их четкой огранки. Наблюдается их частичное слияние (рисунок 4). 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 (рисунок 5).

В наплавленном материале микродефектов не обнаружено, материал - плотный. На границах зерен произошло объединение отдельных крупных карбидов в «дорожки» протяженностью до 5 - 6 мкм с размером отдельных карбидов от 2 мкм. Выделившиеся крупные карбиды являются концентраторами напряжений и приводят к охрупчиванию материала (рисунок 6).



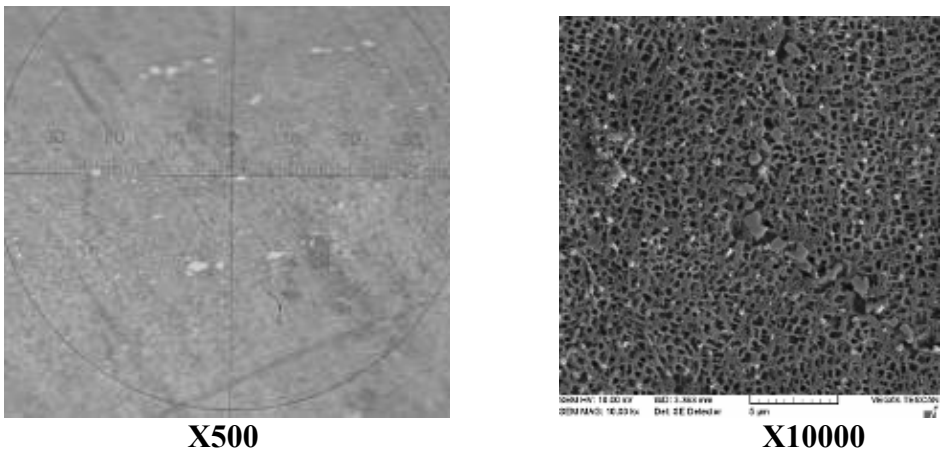
X500 X10000

Рис. 3 – Микроструктура сплава (образец №3) в области около трещины на кромке пера лопатки



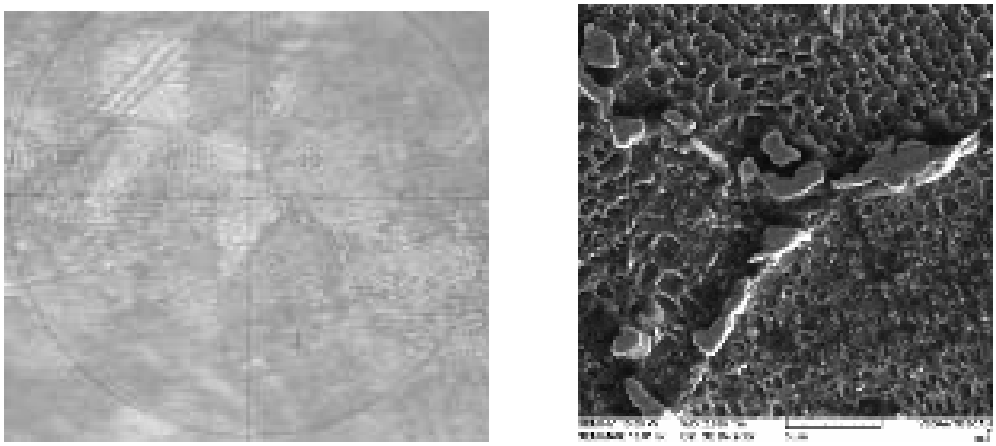
X500 X10000

Рис. 4 – Микроструктура сплава (образец №4) в перовой части лопатки



X500 X10000

Рис. 5 – Микроструктура сплава (образец №10) в замковой части лопатки



X500 X10000

Рис. 6 – Микроструктура наплавочного материала ЭП648 (образец №7)

На образцах, вырезанных из разных зон лопатки (перо, замок, область около трещины, наплавленный материал), проведен рентгеноструктурный анализ (таблица 1). Фазовый состав материала в разных зонах одинаков и представляет собой твердый раствор легирующих элементов, карбидных и интерметаллидных фаз в Ni (γ-фаза). Анализ физического уширения дифракционных линий Ni показал, что в основном и наплавленном материале субзерна крупные (размер ОКР ~500 нм), что соответствует отожженному состоянию. Величина микродеформаций (□) в перовой, замковой и наплавленной частях одного уровня. Следует отметить, что микродеформации в зоне трещины меньше по величине вследствие релаксации микронапряжений при ее раскрытии. Фазовый состав: Ni-твердый раствор легирующих элементов и упрочняющих карбидной и интерметаллидной фаз.

Механические свойства полученные при обработке релаксационных кривых (предел текучести (σ_T), предел микропластичности ($\sigma_{0,2}$)) представлены в таблице 2.

Сравнивая полученные результаты релаксационных испытаний, получаем, что кривая релаксации образца №3, вырезанного около конца трещины, расположена левее остальных кривых и имеет наименьшее значение предела микропластичности σ_0 = 260 МПа при удовлетворительном значении предела текучести $\sigma_т$ = 650 МПа. Наибольший разброс значений предела микропластичности установлен в зоне зарождения и развития трещины (σ_0 = 260 – 430 МПа). Это объясняется накоплением напряжений, вследствие сварочно- наплавочных работ, способствующих разрушению материала.

Все точки релаксационных кривых для перовой части лопатки расположены очень близко и находятся практически на одной кривой, что говорит об однородности состоянии материала. Значения предела текучести находятся в интервале 630- 640 МПа. Значения предела микропластичности имеют разброс от 320 до 450 МПа. Возможно, это связано с неоднородностью микроструктуры и деформационным упрочнением сплава в отдельных микроучастках.

На рабочих лопатках были обнаружены крупные зоны среза и изгибы на входной и выходной кромках, которые впоследствии были устранены методом наплавки. В связи с нарушением масштабного фактора (соотношение массы наплавленного материала к основному) в опасных сечениях лопаток при нагружении детали в процессе эксплуатации наплавленный материал несет основную нагрузку.

Разброс точек на кривой релаксации для образцов из наплавленного материала ЭИ648 незначителен. Предел микропластичности для всех образцов одинаков и составляет σ_0 = 410 МПа. Значение предела текучести изменяется от 520 МПа до 700 МПа, что соответствует требованиям на наплавочный материал ($0{,}8°\sigma_т^{основн.Ма}$). Разброс полученных значений предела текучести можно объяснить наличием сварочных напряжений и структурных неоднородностей. Скопления крупных карбидов на границах зерен в отдельных микроучастках приводят к охрупчиванию материала и снижению предела текучести.

При анализе релаксационных кривых, полученных на образцах замковой части, обнаружен разброс предела микропластичности от 360 до 430 МПа, являющийся результатом структурной неоднородности в материале (выделение вторичных мелких карбидов). Предел текучести всех образцов составил 700МПа.

При этом предел прочности сплава ЭП648 при температуре 800 °С ниже предела прочности основного материала ЭП800-ВД, что приводит к накоплению напряжений в наплавленном материале и последующему трещинообразованию.

Значения предела текучести всех исследованных образцов рабочей лопатки из сплава ЭП800-ВД соответствуют нормативным требованиям ТУ 108.02.125-87 $\sigma_т$ = 630 - 780 МПа. На рисунке 12 приведены значения предела текучести и предела микропластичности для каждого образца.

Для объяснения полученных данных проанализировали отношение предела микропластичности к пределу текучести. Результаты представлены в таблице 1 и на рисунке 13.

Получили, что разброс соотношений $\sigma_0/\sigma_Т$ в перовой части ~ в 2 раза (от 0,4 до 0,79), а в замковой части лопатки всего в 1,2 раза (от 0,5 до 0,6). Это является результатом большой неоднородности в структуре материала перовой части по сравнению с замковой частью рабочей лопатки.

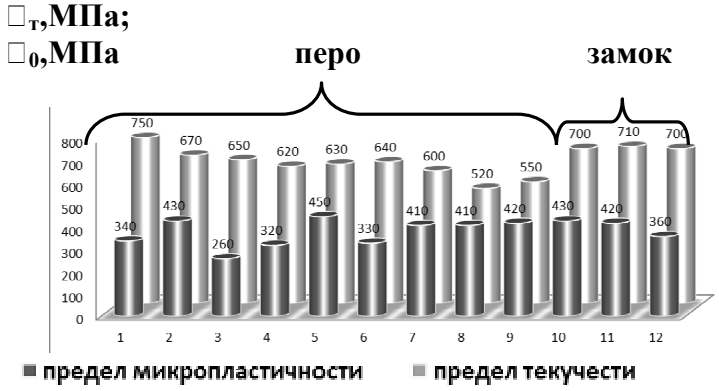


Рис. 12 – Гистограмма изменения предела текучести и предела микропластичности в разных зонах лопатки.

Таблица 1 - Механические характеристики, полученные при обработке релаксационных кривых, для образцов, вырезанных из разных зон лопатки

№	Область исследования	σ_0, МПа	σ_T, МПа	σ_0/σ_T
1	перовая часть вблизи трещины	340	750	0,45
2		430	670	0,64
3		260	650	0,4
4	перовая часть	320	620	0,5
5		450	630	0,7
6		330	640	0,5
7	наплавленный материал	410	600	0,68
8		410	520	0,79
9		420	550	0,76
10	замковая часть	430	700	0,6
11		420	710	0,6
12		360	700	0,5

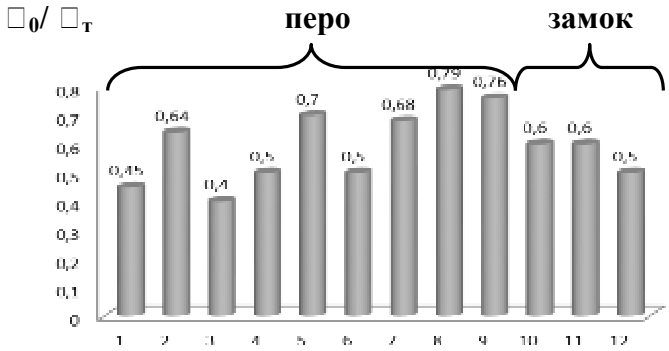


Рис. 13 – Отношение предела микропластичности к пределу текучести образцов, вырезанных из разных зон лопатки

Выводы

1. Структура основного материала находится в удовлетворительном состоянии. По микроструктуре, фазовому составу и физико-механическим показателям основной материал лопатки удовлетворяет требованиям, указанным в ТУ 108.02.125-87.

2. Наплавочный материал подобран правильно; соответствует основному сплаву лопаток по химическому, фазовому составу и по механическим свойствам.

3. В связи с нарушением масштабного фактора (соотношение массы наплавленного материала к основному) в опасных сечениях лопаток при нагружении детали в процессе эксплуатации наплавленный материал не выдержал нагрузку. Зарождение трещин произошло из-за наличия микродеформаций в наплавленном материале.

Литература

1.Скуднов В.А., Чегуров М.К. Релаксация напряжений в металлах и сплавах. Методическое пособие НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2010 г.- 30с.
2.Гецов Л.Б. Материалы и прочность деталей газовых турбин. Кн.1 – Рыбинск: ООО «Издательский дом «Газотурбинные технологии», 2010. – 611 с.

Поступила: 04.10.11.