

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИЧИН ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН В ЛОПАТКАХ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ПАРОВЫХ ТУРБИН ТИПА К-1000-60/3000

В. М. ТОРОП¹, О. В. МАХНЕНКО¹, Г. Ю. САПРЫКИНА¹, Е. Е. ГОПКАЛО²

¹ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренка НАН Украины. 01014, г. Киев, ул. Тимирязевская, 2.
E-mail: info@ipp.kiev.ua

В статье представлены результаты исследований причин образования трещин в лопатках последней ступени паровых турбин К-1000-60/3000, эксплуатирующихся на АЭС Украины. Основные причины, физическая сущность формирования и накопления эрозионной повреждаемости поверхности лопаточных материалов в результате высокоскоростного каплеударного воздействия переохлажденного пара до настоящего времени остаются недостаточно изученными. При выполнении работы был проведен комплекс исследований структуры, химического состава и механических свойств материала лопатки. Выполнены морфологические и фрактографические исследования поверхности трещины. По результатам этих исследований сформулированы выводы о причинах возникновения дефектов и о возможности прогнозирования остаточного ресурса лопаток. Библиогр. 9, табл. 3, рис. 23.

Ключевые слова: эрозионная повреждаемость, трещины, лопатка паровой турбины, морфологические и фрактографические исследования, химический состав, механические свойства, титановый сплав ТС5

На АЭС Украины находятся в эксплуатации пять мощных паровых турбин типа К-1000-60/3000 (рис. 1), сроки эксплуатации которых превышают назначенный производителем ресурс безопасной эксплуатации. Лопатки последних ступеней турбины работают в условиях высоких каплеударных нагрузок, что приводит к интенсивному эрозионному износу (разрушению) их входных кромок [1, 2, 4–6]. Проведение комплексного анализа работоспособности рабочих лопаток из титанового сплава для пятой ступени цилиндра низкого давления (ЦНД) паровой турбины (рис. 2), продление ресурса эксплуатации и отсрочка их замены может обеспечить значительную экономию средств.

До настоящего времени остаются недостаточно изученными основные причины, физическая сущность формирования и накопления эрозионной повреждаемости поверхности лопаточных материалов в результате высокоскоростного каплеударного воздействия переохлажденного пара.

Известно, что эрозия возрастает по мере увеличения длины и окружной скорости лопаток и, следовательно, по мере увеличения скорости соударения с частицами капель пара от 300 до 600 м/с. Во время эксплуатации паровых лопаток интенсивность нарастания скорости эрозии немонотонна. Различают три типичных этапа протекания процессов эрозии (глубины эрозионного износа) во времени. На первом этапе, в так называемом инкубационном периоде, видимых повреждений поверхности нет, потерь массы материала зафиксировать не удается. В ряде работ

показано, что на первом этапе эрозии материала предшествует рост микронапряжений и увеличение в металле лопатки плотности дислокаций предельного значения $10^{12} \dots 10^{13} \text{ см}^{-1}$ [2]. Второй этап характеризуется тем, что имеет место максимальная скорость эрозии и в течение этого отрезка времени она остается практически постоянной. На третьем этапе, по различным причинам эрозия ослабевает.

В литературе известны лишь качественные объяснения вида кинетической кривой износа, основанные на представлениях об изменении характера взаимодействия между каплями и поверхностью в результате изменений рельефа эродированной поверхности. Согласно этим представлениям по истечении инкубационного периода (первого этапа износа) на поверхности с высокой скоростью появляются и накапливаются



Рис. 1. Паровая турбина К-1000-60/3000 для энергетических реакторов ВВЭР-1000



Рис. 2. Общий вид рабочей лопатки пятой ступени цилиндра низкого давления (ЦНД) паровой турбины типа К-1000-60/3000

разрушения, возрастает глубина впадин (второй этап износа). Далее, когда углубления впадин достигают нескольких диаметров капель, заостряются перемычки между кавернами, поверхность приобретает «сотовую» и иглообразную форму, типичную для эрозии турбинных лопаток, происходит уменьшение скорости износа (третий этап износа) [2].

Также известно, что сплавы на основе титана по сравнению со сталями, обладают более высокой стойкостью к ударным нагрузкам [6]. В последние годы ведутся разработки методических подходов, которые позволили бы адекватно характеризовать каплеударное воздействие частиц пара, формирующих ударную волну в объеме титановых лопаток, и проводить количественную оценку эрозионного повреждения с учетом волновой природы пластической деформации [4, 5]. Есть положительные результаты в разработке кавитационно-устойчивых защитных покрытий рабочих лопаток из титанового сплава [6].

Таким образом, проблема анализа причин разрушения рабочих лопаток из титановых сплавов паровых турбин, оценки и продления ресурса их безопасной эксплуатации достаточно актуальна.

Цель исследования. В работе проведено исследование причин возникновения дефектов и появления трещины в лопатке № 74 пятой ступени правого потока турбины ЦНД энергоблока №1 ОП «Хмельницкая АЭС» и сопоставление результатов с данными, полученными на лопатке № 73, отработавшей аналогичный срок эксплуатации более 180 тыс. ч, но не имеющей явных следов трещинообразования.

Фотографии входной кромки рабочей лопатки № 74 пятой ступени ЦНД из титанового сплава TC5 со следами эрозионного износа, отработавших более 180 тыс. ч представлены на рис. 3.

В процессе выполнения работы был проведен комплекс исследований химического состава и механических свойств материала данной лопатки, металлографический и фрактографический анализы. По результатам выполненных исследований сформулированы выводы по причинам возникновения дефектов и прогнозированию остаточного ресурса лопаток.

Материалы и методика исследований. Образцы (темплеты) для металлографических исследований вырезались из входных кромок эродированных лопаток № 74 и № 73 паровой турбины с резами в двух взаимно перпендикулярных сечениях, согласно схеме, представленной на рис.4. Плоскости 1 и 2 – соответствуют поперечному и продольному сечениям лопатки. Направление движения ударной волны, формируемой каплями пара, совпадало с направлением 3. Причем из участка лопатки № 74 с обнаруженной трещиной был вырезан образец (темплет) по всей толщине лопатки размером 15×20 мм. Для сравнения из участка лопатки № 73 с максимальным эрозионным износом (поскольку трещины в лопатке № 73 не обнаружены) также был вырезан образец по всей толщине лопатки.

Для определения химической неоднородности в различных зонах лопатки металлографическим

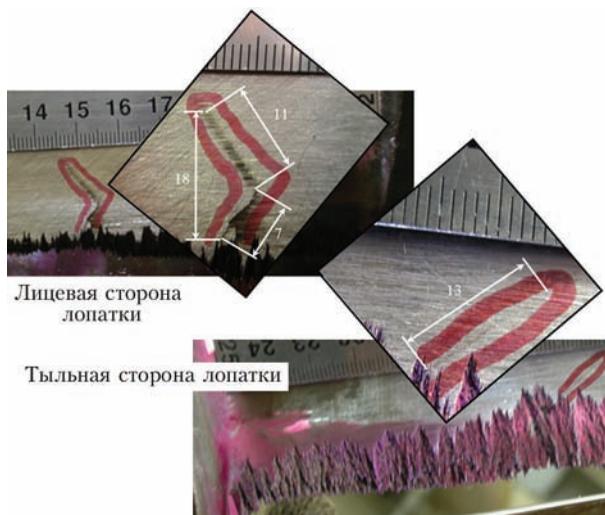


Рис. 3. Эрозионный износ входной кромки рабочей лопатки № 74 пятой ступени ЦНД из титанового сплава TC5, отработавшей более 180 тыс. ч

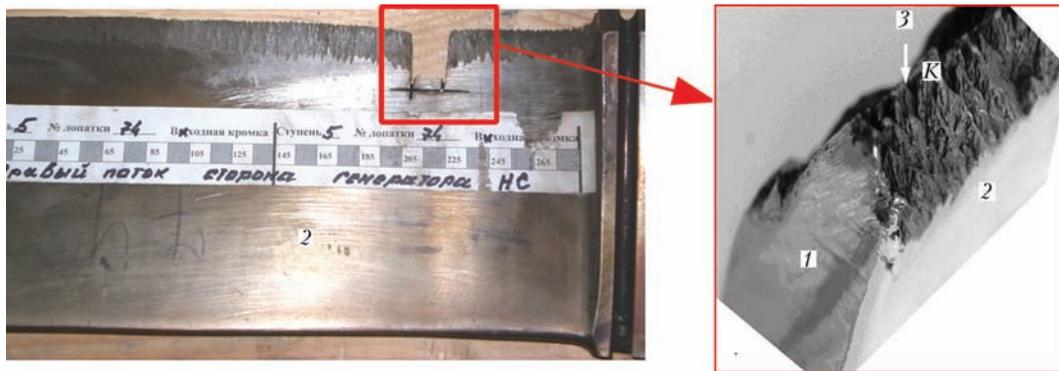


Рис. 4. Схема вырезки темплета для изучения микроструктуры материала лопаток: 1 – поперечное сечение лопатки; 2 – продольное сечение лопатки; 3 – направление движения ударной волны, формируемой каплями пара; К – входная кромка лопатки со следами эрозионного износа

методом были проведены исследования на рентгено-спектальном локальном анализаторе «КАМЕ-БАКС» французской фирмы «КАМЕКА» модели SX-50 с зондом 1...2 мкм и ошибкой определения легирующих элементов 2...5 % от измеряемой величины. Это позволяет определять состав всех легирующих элементов в объеме 1 мкм³. При этих исследованиях пользовались методиками фирмы «КАМЕКА», алгоритмы которых реализованы в вычислительной машине установки PDP 11/73.

Металлографический анализ структурных составляющих материала лопаток из титанового сплава ТС5 после каплеударного нагружения и фрактографические исследования поверхности раскрытой трещины проводили с помощью сканирующего растрового электронного микроскопа (РЭМ) CAMSCAN-4, оснащенного детектором фазового контраста и системой энергодисперсионного локального анализа EDX 200. Микрошлифы для структурного и рентгеноспектрального анализа готовили по стандартной методике с использованием шлифовально-полировального оборудования фирмы Struers.

Исследование структуры и химического состава материала лопатки (сплав ТС5). После изготовления микрошлифов в режиме фазового контраста исследовали микродефекты и микроструктуру мате-

риала лопатки как вдали от эрозионно разрушенного гребня, так и в районе образования трещин, и в районе гребня с эрозионным разрушением вплоть до вершинок и сторон пирамидальных образований, где выявлено наличие мельчайших микротрещин длиной 1...2 мкм и толщиной до 1 мкм.

Установлено, что сплав титановой лопатки представляет собой структуру с α и β составляющими и других фаз не выявлено. Каких-либо структурных изменений и новообразований в зонах эрозии, в районах трещин и в основном металле не обнаружено.

Химический состав сплава ТС5 для лопаток № 73 и № 74 приведен в табл. 1.

Локальный химический анализ металла лопаток различных зон свидетельствует об уменьшении α -стабилизатора, т. е. содержание Al несколько ниже требований документа [7], и увеличении β -стабилизатора, т. е. содержание V выше тре-

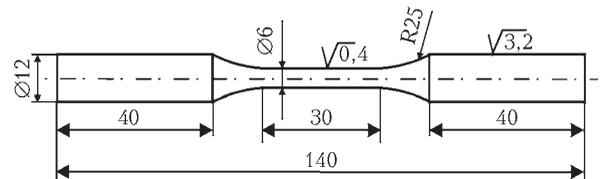


Рис. 5. Образец (тип VII) для определения механических свойств [8]

Таблица 1. Химический состав сплава ТС5 для лопаток № 73 и № 74

Химический элемент	Исследуемый сплав лопатки				
	ТС5 [6]	№ 74 ¹	№ 74 ²	№ 73 ³	№ 73 ⁴
Fe	< 0,13	< 0,1	–	–	–
Al	4,5...6,0	3,64...4,79	4,29...4,61	4,72...4,85	4,72...4,83
Mn	0,15	–	–	–	–
V	1,5	2,1...2,4	1,64...2,27	1,86...2,39	2,19...2,37
Si	< 0,1	3,1	–	–	–
O	0,12	0,051	–	–	–
N	0,05	0,0050	–	–	–
H	0,01	0,0115	–	–	–
Sn	2,5...4,0	3,1	2,91...3,42	3,09...3,54	3,21...3,38
Ti	Основа				

Примечание: 1 – химический состав определен с применением аппарата Camebaks; 2 – химический состав определен с применением аппарата Camscan-4; 3 – химический состав на поверхности 2 определен с применением аппарата Camscan-4; 4 – химический состав на поверхности 3 определен с применением аппарата Camscan-4.

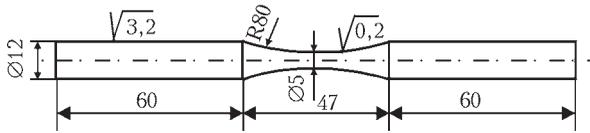


Рис. 6. Образец (тип I) для определения предела выносливости сплава TC5 [9]

бований [7], а также о повышенном содержании водорода на поверхности, прилегающей к «игло-видному» эрозионному повреждению и равному 0,0115 % при норме не более 0,01 %.

Механические свойства материала лопатки (сплав TC5). Для определения механических свойств сплава TC5 в зоне максимального накопления усталостных повреждений из темплета (лопатка № 74) были изготовлены образцы для контроля возможной деградации механических свойств металла лопатки.

Испытания для определения механических свойств при статической нагрузке титанового сплава TC5 проводили в соответствии со стандартом [8]. Образец для определения механических свойств показан на рис. 5.

Статическое нагружение проводили при постоянной скорости перемещения захвата испытательного оборудования, равной 4 мм/мин. После достижения 1 % остаточных деформаций рабочей части образца скорость нагружения составляла 8 мм/мин. База деформометра, установленного на рабочей части образца – 25 мм, а база измерения остаточного удлинения равна расчетной длине образца 30 мм. Температура испытаний 20...25 °С.

Испытания на усталость образцов корсетного типа (рис. 6) проводили в соответствии со стандартом [9]. Испытания на циклическую долговечность проводили в мягком режиме по синусоидальной форме (рис. 7) с постоянной амплитудой нагружения при асимметрии цикла $R_\sigma = -1$.

Критерием окончания проведения испытаний являлось разрушение образца, появление микро (макро) трещины или достижение 10^7 циклов.

Все испытания проводились на испытательной машине MTS 810 с максимальной нагрузкой 250 кН. Протокол испытаний представлен в

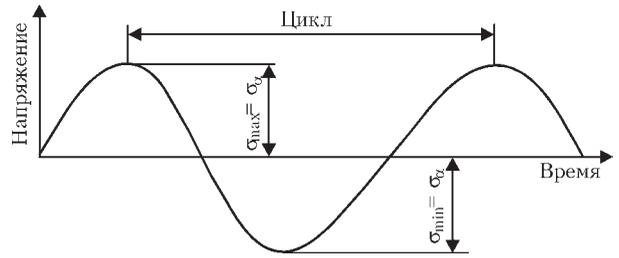


Рис. 7. Характеристика циклического нагружения

табл. 2, а механические свойства сплава TC5 – табл. 3.

Характерные диаграммы деформирования, полученные при испытании образцов номер 1–3, представлены на рис. 8.

Как следует из анализа полученных данных (табл. 3 и рис. 8), экспериментально определенные механические свойства сплава TC5 лопатки № 74 соответствуют требованиям нормативного документа [7].

По результатам проведенных усталостных испытаний было установлено, что при заданных напряжениях цикла разрушение образцов номер 4...6 не наблюдалось после достижения 10^7 циклов переменного нагружения, а значит, предел выносливости материала лопаток составляет $\sigma_{-1} > 350$ МПа. С целью проведения фрактографических исследований образец номер 6 был разрушен после достижения $N = 6\ 089\ 482$ циклов нагружения.

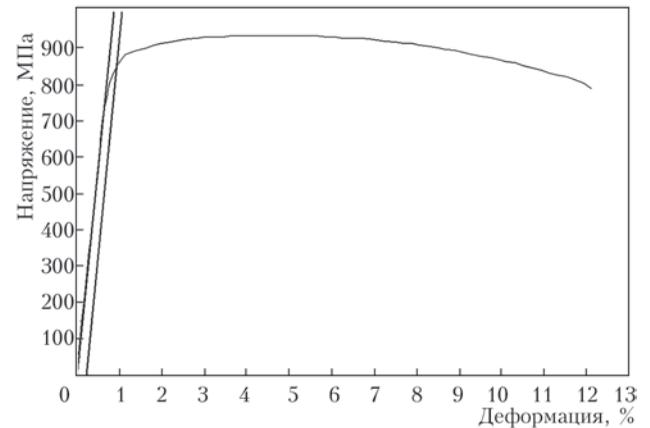


Рис. 8. Диаграммы деформирования при испытании образцов

Таблица 2. Протокол испытаний для определения механических свойств при статическом и циклическом нагружении образцов из титанового сплава TC5

Испытательная машина	База деформометра L_{E0} , мм	База измерения δ_s , мм	Скорость нагружения для определения			$T_{исп.}$, °С
			$\sigma_{0,2}$, мм/мин	σ_B , мм/мин	σ_{-1} , Гц	
MTS 810	25	30	4	8	20	20...25

Таблица 3. Механические свойства сплава TC5 лопатки № 74

Номер образца	Диаметр, мм	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	P_{max} , Н	δ , %	ψ , %	σ_{-1} , МПа
1	6,05	920	838	14113	11	30	–
2	6	920	845	14308	12	30	–
3	6	911	832	13997	10	28	–
4-6	5	–	–	–	–	–	> 350
По [7]	–	≥ 830	750..900	–	≥ 8	≥ 20	350...460

Морфология эродированной поверхности лопаток № 74 и № 73. На входных кромках исследуемых лопаток наблюдается неравномерный пилообразный эрозионный износ металла (см. рис. 3 и 9).

На рис. 9 представлен фрагмент входной кромки лопатки № 73 со следами эрозионного износа с противоположных (продольные плоскости 2 на рис. 4) сторон пера лопатки – параллельно и перпендикулярно направлению движения ударной волны, формируемой каплями пара. На рис. 10 по-

казана микроструктура эродированной поверхности рабочих лопаток № 74 и № 73.

Морфология эродированной поверхности лопаток паровых турбин представляла собой «сотовую» форму, состоящую из глубоких каверн с заостренными перемычками в виде пирамидальных элементов с расстоянием между ними 400...700 мкм.

Характерным является то, что на участке лопатки № 74 с трещиной (рис. 11), наблюдаются еще и многочисленные микротрещины, а для лопатки № 73 такие микротрещины в устьях эродированных поверхностей не обнаружены (рис. 12).

Вероятно это объясняется тем, что при длительной эксплуатации происходящие процессы распада (уменьшение количества) обедненной β – стабилизаторами ОЦК β - фазы и, соответственно, обогащения ванадием и усиление искажения ГПУ-решетки α - фазы способствуют торможению ударной волны, вызванной каплеударной эрозией поверхности лопатки, что в свою очередь приводит к локализации пластических деформаций и торможению микротрещин.

Однако на некоторых участках под поверхностью вблизи границ двух соседних оснований пирамидальных элементов лопатки № 73 наблюдались зародышевые «иглообразные» микротрещины в плоскости 1, и «подковообразные» в плоскости 2 (рис. 13), которые, вероятно, при своем раскрытии приводили к локальному разрушению.

Закономерная периодичность в формировании зародышевых микротрещин и пирамидальных

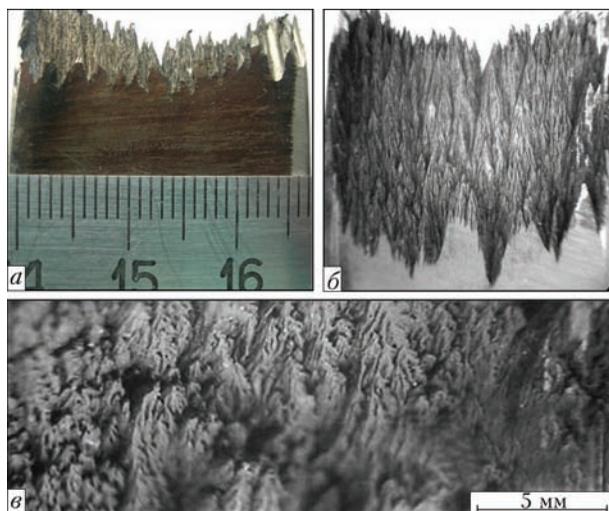


Рис. 9. Фрагмент входной кромки лопатки № 73 со следами эрозионного износа: тыльная сторона лопатки (а), лицевая сторона лопатки (б) – параллельная направлению движения ударной волны, формируемой каплями пара и сторона лопатки, перпендикулярная направлению движения ударной волны, формируемой каплями пара (в)

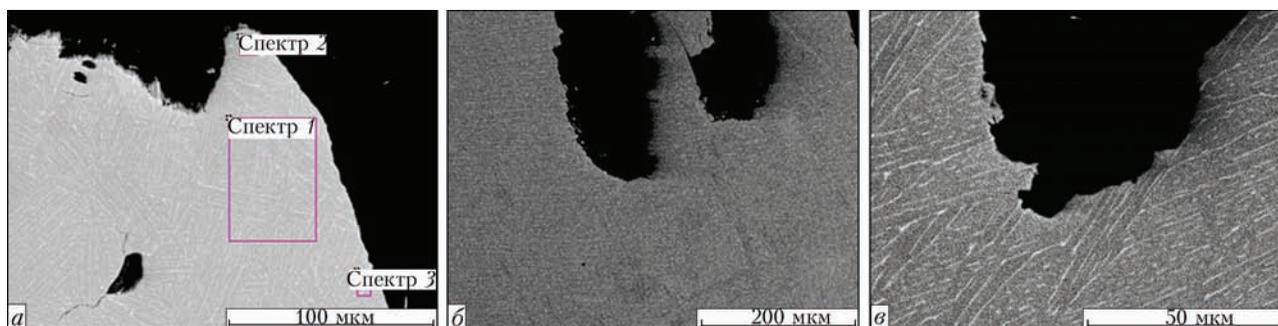


Рис. 10. Микроструктура эродированной поверхности рабочей лопатки № 74 (а) и № 73 (б, в)

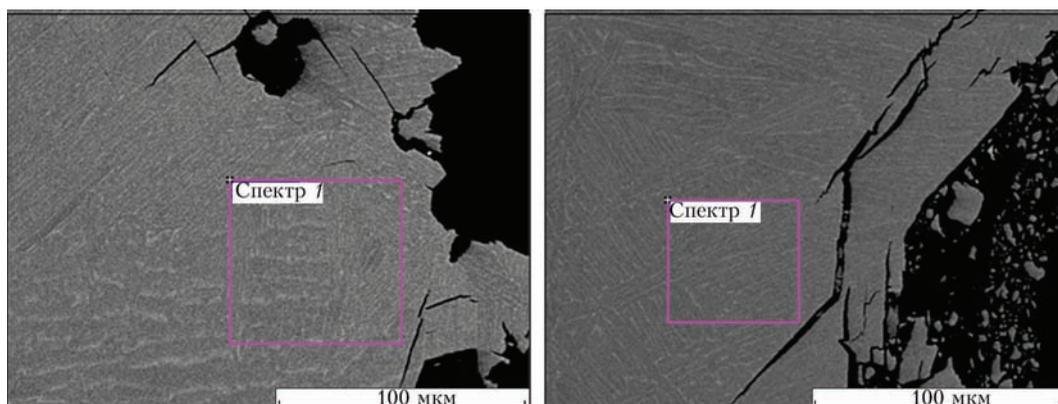


Рис. 11. Зародышевые микротрещины вблизи эродированной поверхности рабочей лопатки № 74

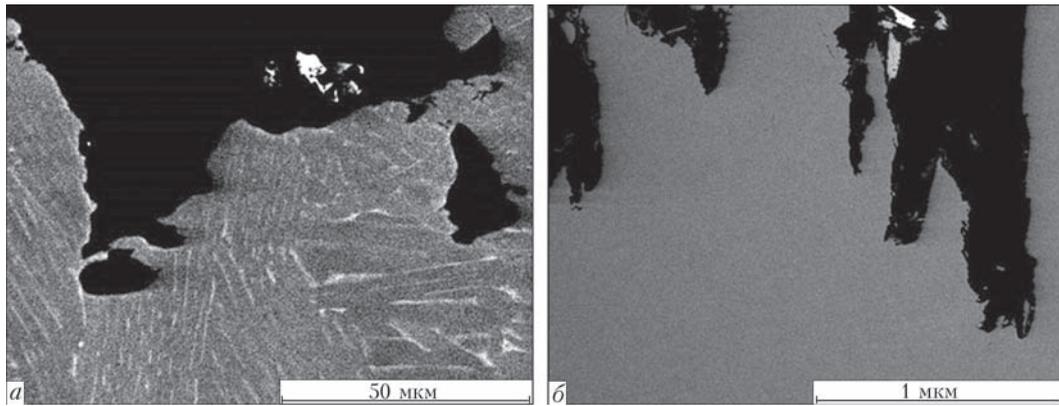


Рис. 12. Микроструктура поверхности рабочей лопатки № 73 вблизи эродированной поверхности в плоскостях 2 (а) и 1 (б) (номера плоскостей см. на рис. 4)

элементов на поверхности лопаток, свидетельствовали о разбиении материала при ударе на мезообъемы размером 400...700 мкм и о локализации пластической деформации и разрушении вдоль их границ раздела.

Структура материала лопаток № 74 и № 73.

Титановый сплав TC5 относится к псевдо- α -сплавам (коэффициент β -стабилизации $K_\beta = 0,13$) с низким содержанием второй фазовой составляющей (β -фазы 2...5 %). Сплав обладает довольно хорошими технологическими свойствами при металлургическом переделе, высокой коррозионной стойкостью и хорошей свариваемостью.

Полное полиморфное превращение в β -состояние (с ОЦК решеткой) сплав достигает при температуре $T_{\text{пп}} = 1020$ °С. По своим теплофизическим параметрам исследуемый сплав можно отнести к категории материалов с низкой плотностью (высокой удельной прочностью), низкой теплопроводностью, низкой энергией дефектов упаковки. Как известно, такие материалы подвергаются сильному деформационному упрочнению, а последующие релаксационные процессы вызывают разупрочнение в значительной мере за счет процессов рекристаллизации, что обусловлено малой вероятностью прохождения процессов полигонизации.

После изготовления микрошлифов по общепринятой методике в режиме фазового контраста исследовали микродефекты и микроструктуру материала лопатки как вдали от эрозийно разрушенного гребня, так и в районе образования трещин, и в районе гребня с эрозийным разрушением вплоть до вершинок и сторон пирамидальных образований, где обнаружено наличие мельчайших микротрещин длиной 1...2 мкм и толщиной до 1 мкм.

Микроструктура материала лопаток № 73 и № 74 непосредственно под эродированной поверхностью как в плоскости 1, так и в плоскости 2 (см. рис. 4) представляет колонии параллельных пластин α -фазы (толщина которых составляет 2...4 мкм), лежащих в пределах границ исходных (превращенных) зерен β -фазы и незначительного количества пересекающих их тонких пластин β -фазы (рис. 10–13).

Дефектов металлургического, технологического и эксплуатационного характера на поверхности подготовленных образцов, вырезанных вдоль и поперек оси лопатки, не обнаружено.

На фотографиях микроструктуры хорошо видны приповерхностные микротрещины (рис. 14), которые, вероятно, сформировались еще в инкубационном периоде, когда видимого разрушения поверхности еще не было. Как показали исследования, в направлении, перпендикулярном движению ударной

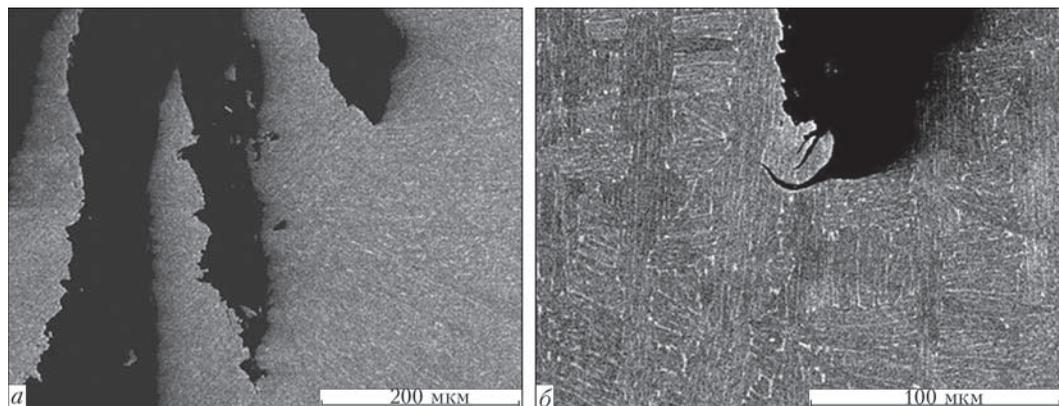


Рис. 13. Зародышевые микротрещины вблизи эродированной поверхности рабочей лопатки № 73 в плоскостях 1 (а) и 2 (б) (номера плоскостей см. на рис. 4).

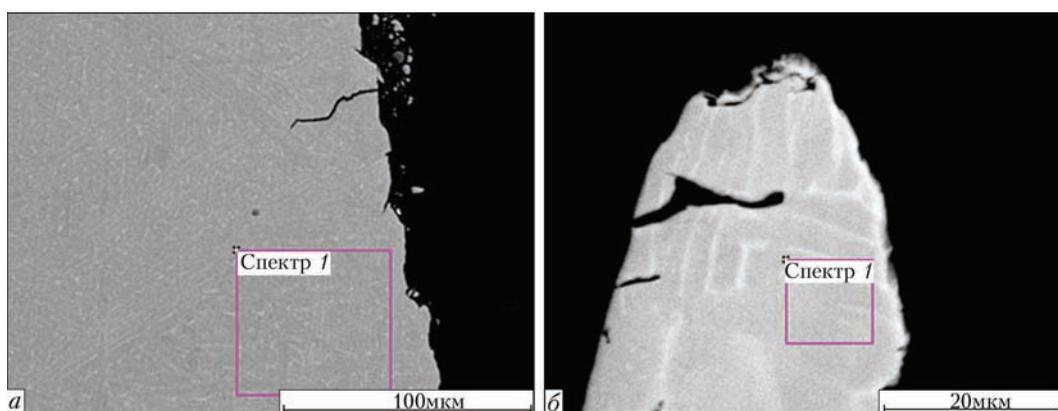


Рис. 14. Микроструктура металла лопатки № 74 из сплава TC5 непосредственно под эродированной поверхностью в плоскости 1

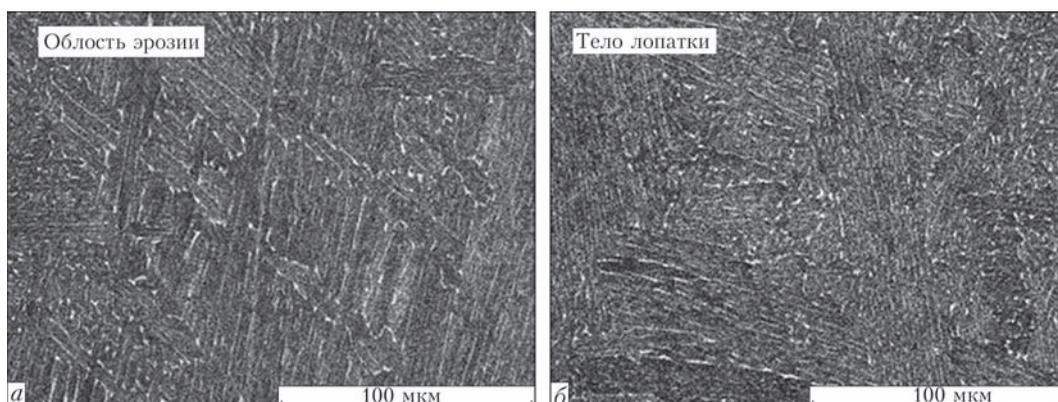


Рис. 15. Микроструктура металла лопатки № 73 из сплава TC5 непосредственно под эродированной поверхностью – область эрозии (а) и в теле лопатки плоскости 1 (б)

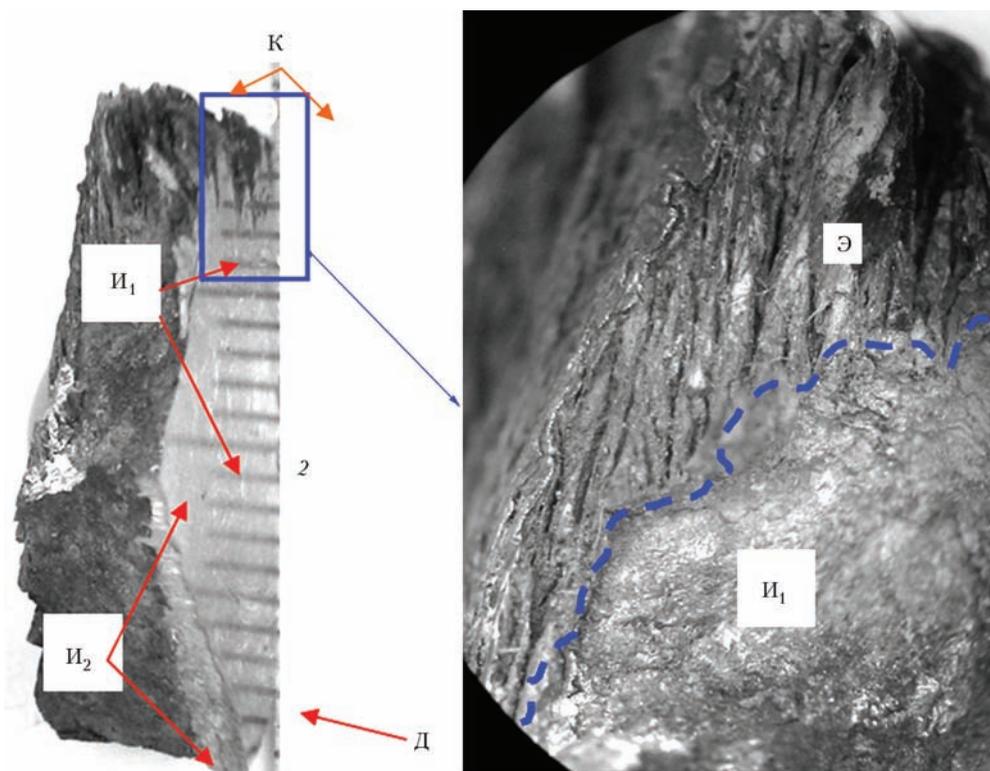


Рис. 16. Общий вид части темплета с раскрытой эксплуатационной трещиной: К – входная кромка, Э – эродированная поверхность в плоскости раскрытой трещины; И₁, И₂ – поверхности эксплуатационного излома под Э до и после поворота трещины, соответственно; Д – зона долома; 2 – плоскость продольного сечения лопатки

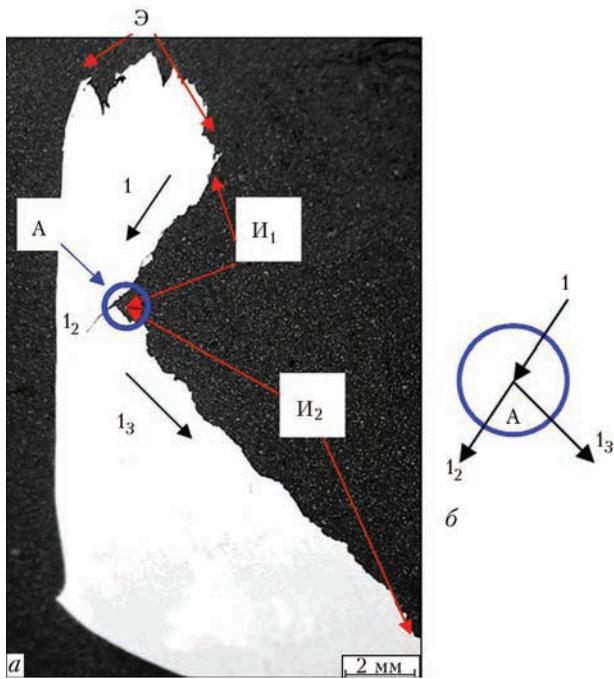


Рис. 17. Траектория (след) трещины в плоскости сечения 2 с лицевой стороны лопатки (на ответной части излома) (а) и схема раздвоения трещины в точке А (б)

волны, непосредственно под эродированной поверхностью, в плоскостях 1 и 2 (рис. 11) формировались множественные поперечные зародышевые микротрещины, ориентированные под углом 90 град. к направлению вытянутости колоний параллельных пластин α -фазы с ГПУ решеткой и разделяющих их

тонких (шириной 0,1...0,4 мкм) прослоек β -фазы с ОЦК решеткой (рис. 11, 13–15).

Фрактографические исследования поверхности трещины, обнаруженной в лопатке № 74. Для проведения фрактографических исследований поверхности обнаруженной в лопатке № 74 эксплуатационной трещины ее раскрыли в жидком азоте, предварительно вырезав темплет, содержащий трещину, из пера лопатки.

Общий вид раскрытой эксплуатационной трещины (с разными зонами разрушения) и макрофрактограммой части излома показан на рис. 16, а траектория (след) трещины в плоскости 2 с лицевой стороны лопатки (на ответной части излома) на рис. 17.

На рис. 18 и 19 представлены характерные микрофрактограммы, полученные на электронном растровом микроскопе CAMSCAN-4 при исследовании поверхности разрушения лопатки № 74.

На рис. 20 представлены микрофрактограммы трещины под поверхностью эрозионного износа в зоне I₁ ближе к тыльной поверхности лопатки. Степень коррозионного растрескивания и коррозионных повреждений поверхности разрушения больше, чем в предыдущем случае, хотя признаков усталости не обнаружено.

Микрофрактограммы трещины в зоне I₁ у тыльной поверхности лопатки вблизи границы с зоной I₂ представлены на рис. 21. Хрупкое и

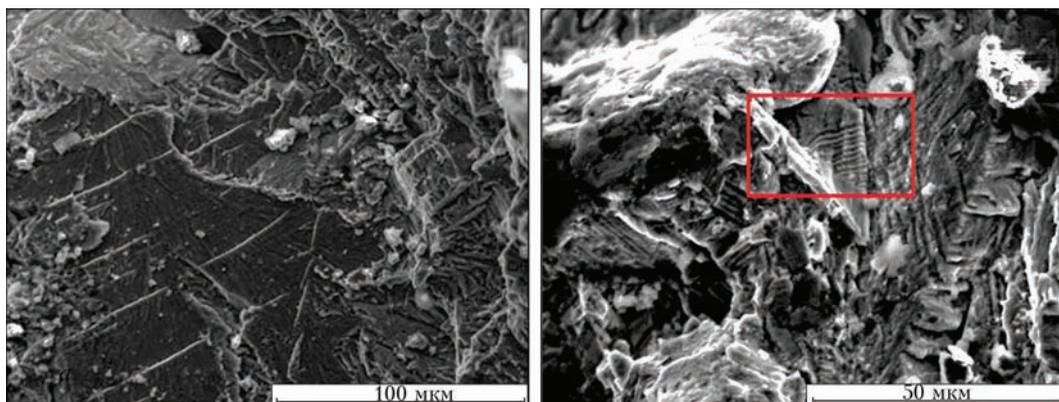


Рис. 18. Характерные микрофрактограммы с поверхности излома раскрытой трещины

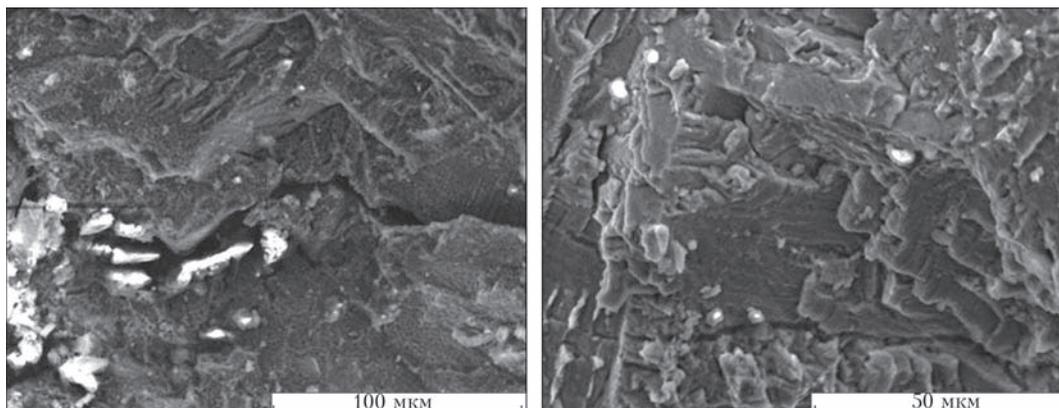


Рис. 19. Вторичные микротрещины при разрушении металла лопатки № 74 (сплав TC5)

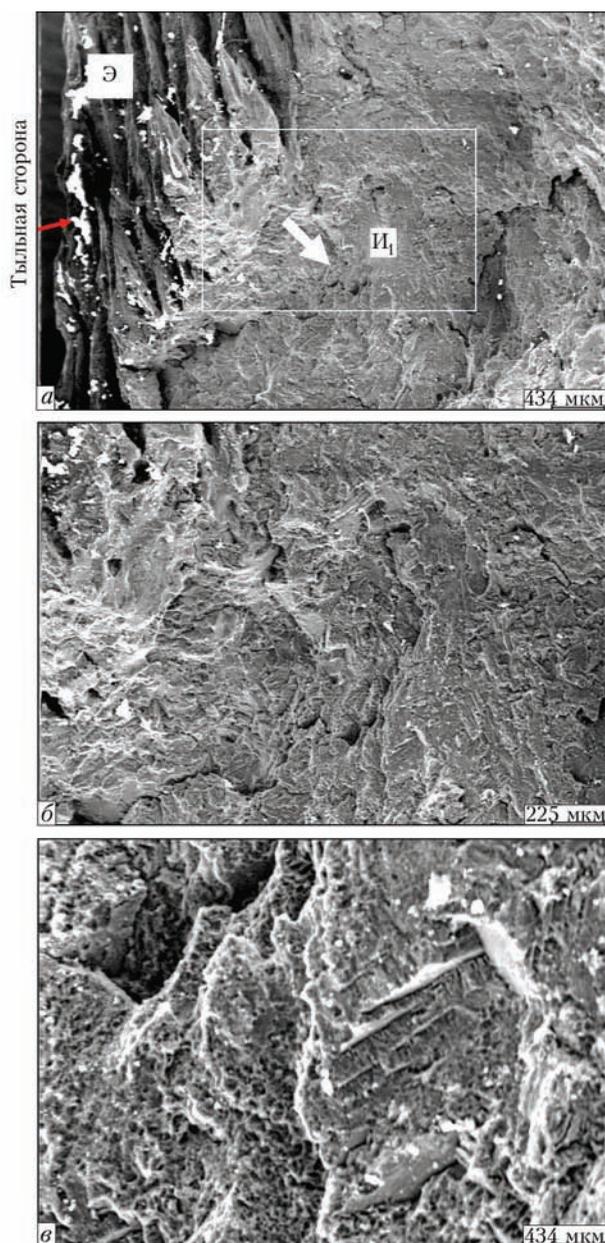


Рис. 20. Микрофрактограммы трещины под поверхностью эрозионного износа в зоне I_1 ближе к тыльной поверхности лопатки

квасихрупкое разрушение с образованием вторичных трещин без видимых следов коррозионных повреждений (рис. 21, а и б). Изредка встречаются участки с усталостными бороздками с шагом δ меньше 1 мкм (рис. 21, в) При больших увеличениях видно, что поверхность разрушения сильно фрагментирована (рис. 21, б и в).

Микрофрактограммы трещины в средней части зоны I_2 представлены на рис. 24. Квасихрупкое разрушение без видимых следов коррозионных повреждений. Наряду с пластинчатым рельефом α -фазы (рис. 22, б) периодически выявляется усталостный рельеф в виде террас с усталостными бороздками (шаг бороздок δ в пределах 1...3 мкм) (рис. 22, в, г).

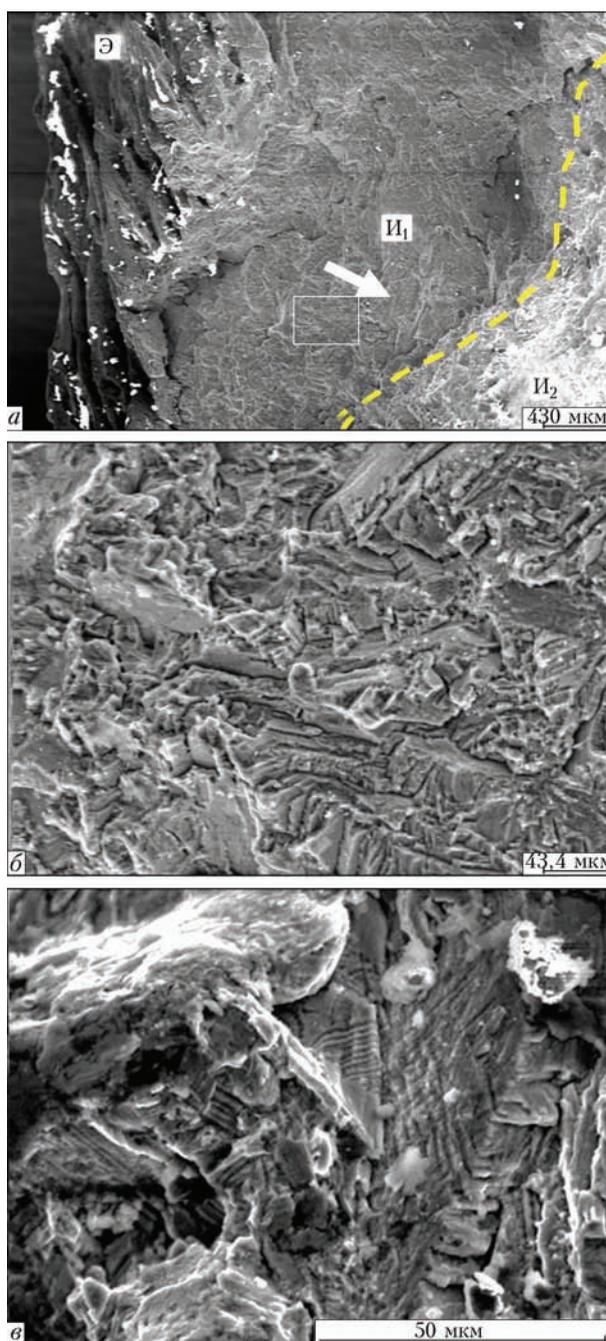


Рис. 21. Микрофрактограммы трещины в зоне I_1 у тыльной поверхности лопатки вблизи границы с зоной I_2

В целом, разрушение лопатки № 74 носит сложный характер. Так, согласно рис. 20 и 21, при хрупком и квазихрупком механизмах разрушения в области излома под поверхностью эрозионного износа (в зоне I_1) микрофрактограммы характеризуются коррозионным растрескиванием и следами точечных коррозионных повреждений, причем ближе к тыльной поверхности лопатки степень коррозионного растрескивания и коррозионных повреждений выше (рис. 21), чем в зоне I_1 ближе к лицевой поверхности (рис. 20). Признаков усталости под поверхностью эрозионного износа в зоне I_1 не обнаружено, однако с удалением от входной кромки границы с зоной I_2 изредка

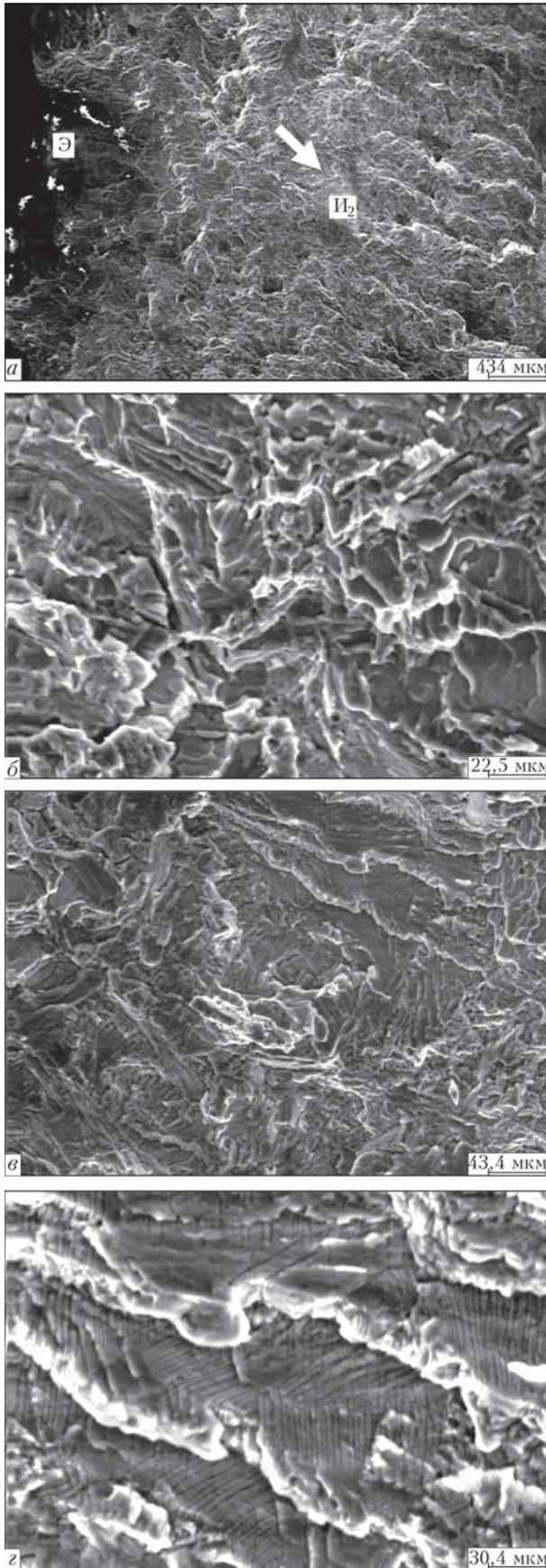


Рис. 22. Микрофрактограммы трещины в средней части зоны II_2 (описание а–г см. в тексте)

встречаются участки с усталостными бороздками с шагом δ меньше 1 мкм (рис. 21, в), степень коррозионных повреждений снижается.

В средней части зоны II_2 (рис. 22) наблюдается квазихрупкое разрушение без видимых следов коррозионных повреждений. Наряду с пластинчатым рельефом α -фазы (рис. 22, б) периодически выявляется усталостный рельеф в виде террас с усталостными бороздками (шаг бороздок δ в пределах 1...3 мкм) (рис. 22, в, г).

При общем хрупком и квазихрупком механизме развития магистральной трещины и наличии вторичных микротрещин на многих участках поверхности разрушения наблюдается пластинчатый микрорельеф колоний α -фазы, напоминающий усталостные бороздки. Наличие характерных бороздок усталости, обнаруженных на поверхности излома (рис. 21, в, 22, в и г), свидетельствует об усталостном механизме роста трещины, наряду с коррозионным растрескиванием.

Особенности разрушения гладких образцов после усталостных испытаний. Микрофрактограммы в разных зонах поверхности разрушения гладкого образца № 6 после усталостных испытаний при $t = 20^\circ\text{C}$ ($N = 60\,089\,482$ цикла) показаны на рис. 23. Поверхность разрушения носит волокнистый характер (рис. 23, д) с множеством гребней отрыва (рис. 23, а и б) и сильно фрагментирована. Участки с усталостными бороздками наблюдаются в средней части излома (рис. 23, в и г). Шаг бороздок δ участка, изображенного на рис. 23, в колеблется в пределах 1...2 мкм, а на рис. 23, г – в пределах 3...5 мкм.

Анализ работоспособности рабочих лопаток после длительной эксплуатации. Поскольку, за период эксплуатации более 180 тыс. ч под действием вибрационных нагрузок на базе более 10^{10} циклов во всех лопатках ЦНД пятой ступени была обнаружена только одна трещина (лопатка № 74), основной причиной образования которой по результатам проведенных исследований является не усталостный механизм, а эрозионный износ в сочетании, вероятнее всего, с внутренним дефектом при изготовлении, то максимальная величина размаха вибрационных напряжений в материале лопатки существенно ниже уровня предела выносливости для сплава ТС5, который составляет приблизительно 300...400 МПа. Следовательно, образование макротрещин по усталостному механизму в лопатках ЦНД пятой ступени турбины К-1000-60/3000 при дальнейшей эксплуатации маловероятно. Принимая во внимание высокие механические характеристики материала ТС5 лопатки, в том числе при циклическом нагружении, и отсутствие их деградации после длительной эксплуатации, возможно сделать предварительное заключение для лопаток данной конструкции с наработкой око-

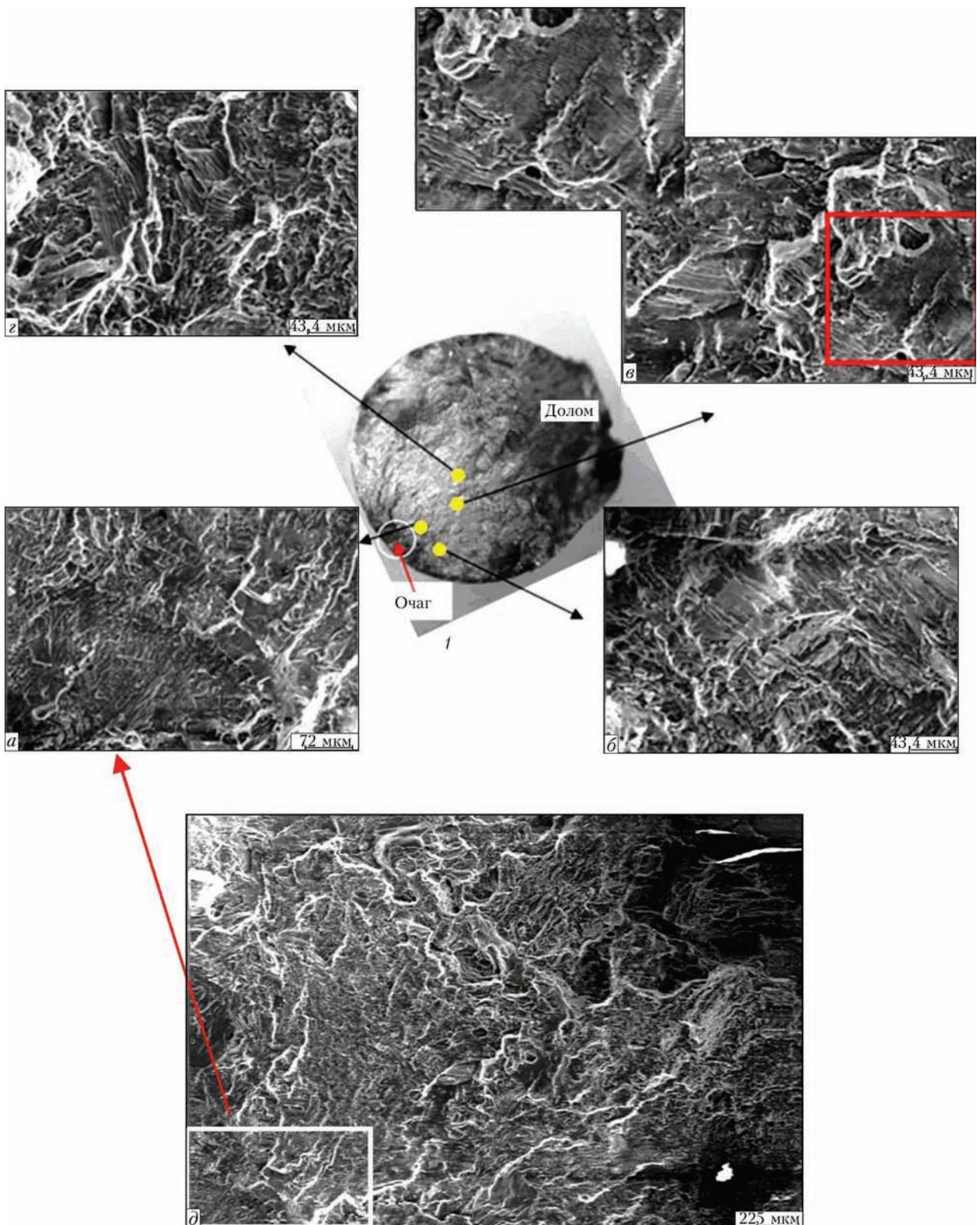


Рис. 23. Макро- и микрофрактограммы поверхности разрушения гладкого образца номер 6 после усталостных испытаний ($N = 6\,089\,482$ цикла). Макроизлом (1); микрофрактограммы в разных зонах (описание см. в тексте)

до 180 тыс. ч о достаточной работоспособности на период эксплуатации до 1 года до следующего ППР.

Однако для более точного прогнозирования ресурса эксплуатации рабочих лопаток 5-ой ступени ЦНД турбины К-1000-60/3000 с учетом эрозионного износа необходимо изучить напряженно-де-

формированное состояние лопатки под воздействием центробежных сил, каплеударной эрозии поверхности и усталостного нагружения при различных режимах эксплуатации, в том числе при прохождении резонансных частот в момент пуска турбины и повышенных оборотах до 3300 об/мин

и др., а также провести исследования зарождения макротрещин в местах концентрации напряжений, вызванных эрозионными повреждениями, и определить критические размеры трещин для потенциально опасных сечений лопаток.

Выводы

1. Зарождение трещины в лопатке № 74 произошло в месте максимального эрозионного размыва вследствие длительной эксплуатации. При общем хрупком и квазихрупком механизме развития магистральной трещины и наличии вторичных микротрещин на многих участках поверхности разрушения наблюдается пластинчатый микрорельеф колоний α -фазы, напоминающий усталостные бороздки. Наличие характерных бороздок усталости, обнаруженных на поверхности излома, свидетельствуют об усталостном механизме роста трещины наряду с коррозионным. Поворот магистральной трещины при ее распространении и механизме квазихрупкого растрескивания, видимо, вызван совместным воздействием изгибных (мода 1 – растяжение) и крутильных (мода 2 – сдвиг) колебаний.

2. В результате длительной эксплуатации произошли изменения химического состава сплава TC5 лопаток № 73 и № 74. Локальный химический анализ металла лопаток различных зон свидетельствует об уменьшении α -стабилизатора (содержание Al ниже требований [6]). Особо следует отметить наличие повышенного содержания водорода на поверхности, прилегающей к «игло-видному» эрозионному повреждению и равному 0,0115 % при норме не более 0,01 %.

3. Структурные исследования металла лопаток непосредственно под эродированной поверхностью показали наличие следов периодической локализации пластической деформации и разрушения в отдельных ГПУ зернах. Характерным является тот факт, что если для участка лопатки № 74, который содержит трещину, наблюдаются микротрещины, то для лопатки № 73, как правило, такие микротрещины в устьях эродированных поверхностей обнаружены не были. Это, вероятно объясняется тем, что при длительной эксплуатации происходящие процессы распада (уменьшение количества) обедненной β -стабилизаторами ОЦК β -фазы, и соответственно, обогащение ванадием и усиление искажения ГПУ- решетки α -фазы способствует торможению ударной волны, вызванной каплеударной эрозией поверхности лопатки, что в свою очередь приводит к локализации пластических деформаций и торможению микротрещин.

4. Механические свойства титанового сплава TC5 лопаток № 73 и № 74 соответствуют нормативным значениям, а деградации механических свойств за время эксплуатации не наблюдается.

Механические свойства определялись на стандартных образцах, вырезанных из неповрежденных каплеударной эрозией зон лопаток.

5. Поскольку, основной причиной образования трещины в рабочей лопатке 5-ой ступени ЦНД турбины К-1000-60/3000 по результатам проведенных исследований является не усталостный механизм, а эрозионный износ в сочетании, вероятнее всего, с внутренним дефектом при изготовлении, то учитывая высокие механические характеристики материала TC5 лопатки, в том числе при циклическом нагружении, и отсутствие их деградации после длительной эксплуатации, возможно сделать предварительное заключение для лопаток данной конструкции с наработкой около 180 тыс. часов о достаточной работоспособности на период эксплуатации до 1 года до следующего ППР с обязательной диагностикой их технического состояния. Для более точного прогнозирования ресурса эксплуатации рабочих лопаток с учетом эрозионного износа необходимо выполнить исследование напряженно-деформированное состояние лопатки при различных режимах эксплуатации.

Список литературы

1. Костюк А. Г. (2007) *Динамика и прочность турбомашин*. Москва, Издательский дом МЭИ.
2. Дейч М. Е., Филипов Г. А. (1987) *Двухфазные течения в элементах теплоэнергетического оборудования*. Москва, Энергоатомиздат.
3. Ланина А. А. (2009) *Особенности структурных и фазовых превращений в титановых лопатках паровых турбин в процессе каплеударного воздействия*. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Санкт-Петербург.
4. Крылов Н. А., Скотникова М. А., Цветкова Г. В., Иванова Г. В. (2016) Влияние структуры и фазового состава материала лопаток паровых турбин из титанового сплава на их устойчивость к эрозионному разрушению. *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Естественные и инженерные науки*, 3(249), сс. 86–92.
5. Білоус В. А., Воеводін В. М., Хороших В. М. та ін. (2016) Створення експериментального обладнання і основних технологічних прийомів отримання кавітаційно-стійких захисних покриттів на робочих поверхнях лопаток парових турбін з титанового сплаву VT6 з метою заміщення імпорту аналогічної продукції. *Наука та інновації*, 12, 4, 29–39.
6. Канель Г. И., Разоренов С. В., Уткин А. В., Фортов В. Е. (1996) *Ударно-волновые явления в конденсированных средах*. Москва, Янус-К.
7. ТУ 1-5-130-78 (1978) *Прутки катаные и кованные из титанового сплава. Марка TC5*.
8. ГОСТ 1497-84 (1984) *Металлы. Методы испытаний на растяжение*.
9. ГОСТ 25502-79 (1981) *Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость*.

References

1. Kostyuk, A.G. (2007) *Dynamics and strength of turbomachines*. Moscow, Izd. Dom MEI [in Russian].
2. Dejch, M.E., Filipov, G.A. (1987) *Two-phase flows in components of thermal power generation equipment*. Moscow, Energoatomizdat [in Russian].
3. Lanina, A.A. (2009) *Features of structural and phase transformations in titanium blades of steam turbines during drop-impact effect*. In: Syn. of Thesis for Cand. of Techn. Sci. Degree. St.-Petersburg [in Russian].

4. Krylov, N.A., Skotnikova, M.A., Tsvetkova, G.V., Ivanova, G.V. (2016) Influence of the structure and phase composition of the material of steam turbine blades from a titanium alloy on their resistance to erosion fracture. *Nauchno-Tekhnicheskije Vedomosti St.-PPU. Estestvennyye i Inzhenernyye Nauki*, 3(249), 86-92 [in Russian].
5. Bilous, V.A., Voevodin, V.M., Khoroshikh, V.M. et al. (2016) Development of experimental equipment and basic techniques for producing cavitation-resistant protective coatings on working surfaces of steam turbine blades from titanium alloy VT-6 with a purpose of substitution of import of similar products. *Nauka ta Innovatsii*, 12(4), 29-39 [in Ukrainian].
6. Kanel, G.I., Razorenov, S.V., Utkin, A.V., Fortov, V.E. (1996) *Shock-wave phenomena in condensed media*. Moscow, Yanus-K [in Russian].
7. TU 1-5-130-78 (1978): *Rods rolled and forged from titanium alloy*. Grade TS5 [in Russian].
8. GOST 1497-84 (1984): *Metals. Tensile testing methods* [in Russian].
9. GOST 25502-79 (1981): *Strength analysis and testing in mechanical engineering. Methods of mechanical testing of metals. Methods of fatigue testing* [in Russian].

V. M. ТОРОП¹, О. В. МАХНЕНКО¹, Г. Ю. САПРИКИНА¹,
Е. Е. ГОПКАЛО²

¹ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua
²Ін-т проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України. 01014, м. Київ, вул. Тимірязевська, 2. E-mail: info@ipp.kiev.ua

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРИЧИН УТВОРЕННЯ
ТРІЩИН В ЛОПАТКАХ З ТИТАНОВОГО СПЛАВУ
ПАРОВИХ ТУРБІН ТИПУ К-1000-60/3000

У статті представлені результати досліджень причин утворення тріщин в лопатках останнього ступеня парових турбін К-1000-60/3000, що експлуатуються на АЕС України. Основні причини, фізична сутність формування і накопичення ерозійної пошкоджуваності поверхні матеріалів лопаток в результаті високошвидкісного краплеударного впливу переохолодженої пари до теперішнього часу залишаються недостатньо вивченими. При виконанні роботи було проведено комплекс досліджень структури, хімічного складу і механічних властивостей

матеріалу лопатки. Виконано морфологічні і фрактографічні дослідження поверхні тріщини. За результатами цих досліджень сформульовані висновки про причини виникнення дефектів і про можливість прогнозування залишкового ресурсу лопаток. Бібліогр. 9, табл. 3, рис. 23.

Ключові слова: ерозійна пошкодженість, тріщини, лопатка парової турбіни, морфологічні та фрактографічні дослідження, хімічний склад, механічні властивості, титановий сплав ТС5

V.M. TOROP¹, O.V. MAKHNENKO¹, G.Yu. SAPRYKINA¹,
E.E. GOPKALO²

¹ E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazimir Malevich str., 03150, Kiev. E-mail: office@paton.kiev.ua

² G.S.Pisarenko Institute for Problems of Strength of the NAS of Ukraine, 2 Timiryazevskaya str., 01014, Kyiv, Ukraine. E-mail: info@ipp.kiev.ua

RESULTS OF STUDYING THE CAUSES FOR CRACKING
IN TITANIUM ALLOY BLADES OF STEAM TURBINES OF
K-1000-60/3000 TYPE

The paper presents the results of studying the causes for cracking in blades of the last stage of steam turbines K-1000-60/3000, operating in Ukrainian NPP. The main causes, physical essence of formation and accumulation of erosion damage of blade material surface as a result of high-velocity drop impact of overcooled steam still remain insufficiently studied. During performance of the work, a comprehensive study of the structure, chemical composition and mechanical properties of blade material was conducted. Morphological and fractographic investigations of the crack surface were performed. Proceeding from the results of these studies, conclusions were formulated on the causes of defects and the possibility of prediction of the residual life of blades. 9 References, 3 Tables, 23 Figures.

Keywords: erosion damage, cracks, steam turbine blade, morphological and fractographic studies, chemical composition, mechanical properties, titanium alloy TS5

Поступила в редакцію
20.02.2018



1st INTERNATIONAL CONFERENCE ON WELDING & NON DESTRUCTIVE TESTING 2018
1st ICWNDT-2018

October 22-23, 2018, Athens – Greece

Conference Topics:

Advanced NDT and Ultrasonic Techniques
Advanced joining processes
Aerospace and Marine.
Applications and innovations of NDT methods.
Applications for the power generation (including nuclear technologies).
Applications for the shipping and aerospace industries.
Composite materials, Welding and Adhesion
Developments in automation of welding processes
Developments in dissimilar materials joining
Developments in pipeline construction
Developments in welding consumables
Developments in welding power sources technology
Digital Radiography.
Fundamental and applications of welding and joining process.
Industrial Manufacturing.

Inspection, Training and Certification of Welding and NDT personnel.
Microstructure and metallurgical behaviors in welds
Modeling and Simulation of Welds and Welded Structures.
NDT applications in the civil structures industry.
NDT for the diagnostics and refurbishment of cultural heritage monuments
NDT in Medical Applications.
NDT Technology Transfer.
Non-Contact NDT methods.
Residual stress and distortion in weldments.
Testing and inspections for weld integrity.
Theoretical modeling.
Weld properties and performance.
Weldability of materials.
Welding consumables and equipments.
Welding practices in industries.