

УДК 620.22.621

Г. В. Кречковська
ФРАКТОГРАФІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗЛАМІВ ЛОПАТКИ ПАРОВОЇ ТУРБИНИ

На основі візуального обстеження пошкоджених лопаток ротора парової турбіни, аналізу дефектів на їх поверхні та характерних механізмів руйнування пошкоджених елементів циліндра низького тиску парової турбіни визначили можливі причини виникнення та розвитку в них пошкоджень. Показано, що на опуклій поверхні в околі вихідної крайки по довжині лопатки зародилися тріщини. Вони поширювалися поперек пера лопатки за умов багаточислової корозійної втоми з формуванням типового поєднання між- і крізьзеренного руйнування.

Ключові слова: лопатки парової турбіни, механізми руйнування, фрактографічні дослідження.

Рис. 6. Літ. 9.

Г. В. Кречковская
ФРАКТОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗЛОМОВ ЛОПАТКИ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ

На основе визуального обследования поврежденных лопаток ротора паровой турбины, анализа дефектов на их поверхности и характерных механизмов их разрушения поврежденных элементов цилиндра низкого давления паровой турбины определены возможные причины возникновения и развития в них повреждений. Показано, что на выпуклой поверхности в окрестности исходной кромки по длине лопатки зародились трещины. Они распространялись поперек пера лопатки в условиях многоциклового коррозионной усталости с формированием типичного сочетания меж- и криззеренного разрушения.

Ключевые слова: лопатки паровой турбины, механизмы разрушения, фрактографические исследования.

H. V. Krechkovska
FRACTOGRAPHIC RESEARCH KINKS OF STEAM TURBINE BLADE

Based on a visual inspection of the damaged rotor blades of steam turbines, analysis of defects on the surface and characteristics mechanisms of destruction of damaged items cylinder low pressure of steam turbine identified possible causes and development of these damages. It is shown that on the convex surface in the vicinity of the initial length of the blade edge on the crack originated. They spread across the blade under conditions many cyclic corrosion fatigues with the formation of a typical combination of inter- and through grains destruction.

Keywords: steam turbine blade, fracture mechanisms, fractographic research.

Актуальність. Лопатки парової турбіни експлуатуються за жорстких умов сумісного впливу високих напружень (тиск пари, відцентрові та динамічні сили [1], температури та активного робочого середовища). В лопатках сталого поперечного перерізу відцентрові сили викликають в основному напруження розтягу. В закручених лопатках, переріз яких змінюється, додатково виникають ще і значні напруження згину і кручення. [2].

В сучасних турбінах лопатки категорії міцності КП50 и КП60 виготовляються із сталі мартенситного класу 20X13 [3]. Мартенситна структура сталі забезпечує їй високу жароміцність, високий опір корозії (під дією перегрітої і вологої пари), окисненню, ерозії, стабільність структури оптимальні показники міцності за високої пластичності. Разом з тим серед основних причин руйнування лопаток під час експлуатації парових турбін називають виникнення та поширення в них тріщини аж до критичної величини [4]. Виникнення тріщин пов'язують з поширенням вібрації з робочої частини лопаток в глибину хвостового з'єднання [5], з високим рівнем статичних напружень розтягу і згину [2], наявністю концентраторів напружень [6], втому, що відбувається на фоні високих статичних напружень, фретинг-утомою, корозійною втому або внаслідок кавітаційно-ерозійного зношування тощо [7-9].

Об'єкт досліджень та використані методики. Вивчали особливості руйнування металу з лопатки парової турбіни після $3 \cdot 10^4$ год її експлуатації. Виготовили лопатки зі сталі 15X11МФ-Ш (0,16%С, 0,31%Si, 0,33%Mn, 0,008%S, 0,024%P, 10,4%Cr, 0,7%Mo, 0,38%Ni, 0,360%V, 13%Cu). За результатами візуального огляду і аналізу пошкоджених фрагментів лопатки утомні злами в декількох місцях по її довжині від її вихідної крайки. Фрактографічні дослідження особливостей та характеру руйнування металу та поширення в ньому тріщин проводили на сканівному електронному мікроскопі EVO-40XVP із системою спектрального мікроаналізу INCA Energy 350.

Основні результати дослідження. На опуклій та увігнутій поверхнях лопатки в околі її крайок біля хвостовика зафіксували істотні корозійні ураження у вигляді міжзеренного вторинного розтріскування (рис. 1а). Чим далі від хвостовика тим їх стає більше, і вторинні тріщини стають глибшими. На виході до опуклої поверхні пера лопатки з'являються сліди ерозійного зношування у вигляді канавок, спричинених рухом технологічного середовища (рис. 1б). За вищої роздільної здатності видно, що ці кавітаційні ушкодження є безпосередньо на вихідній крайці і на виході до опуклої поверхні пера лопатки (рис. 1в) достатньо глибокі, щоб за сприятливих умов навантаження (зокрема під час резонансу) від них могли зародитися тріщини.

Подібні ураження зафіксували і зі сторони увігнутої поверхні пера лопатки, але вони менш інтенсивні і їх виявили на деякій віддалі від вихідної крайки.

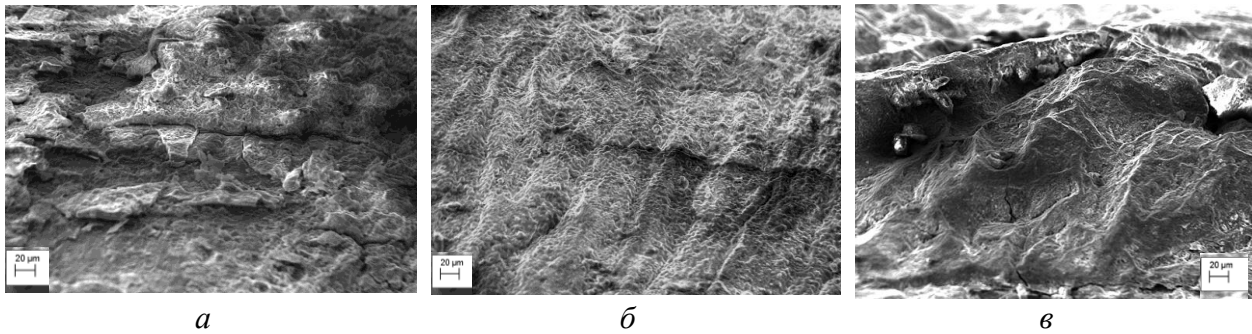


Рис. 1. Корозійно-ерозійні ураження в околі вихідної крайки біля хвостовика на опуклій поверхні пера лопатки

Аналіз корозійних і ерозійних уражень безпосередньо на гребені вхідної крайки лопатки в околі хвостовика виявив, що їх густина та глибина істотно менша (рис. 2а). На увігнутій поверхні лопатки виявили незначні кавітаційні пошкодження (рис. 2б), а на опуклій ознаки загальної корозії (рис. 2в). Загалом ці пошкодження не могли створювати небезпеки під час експлуатації лопатки.

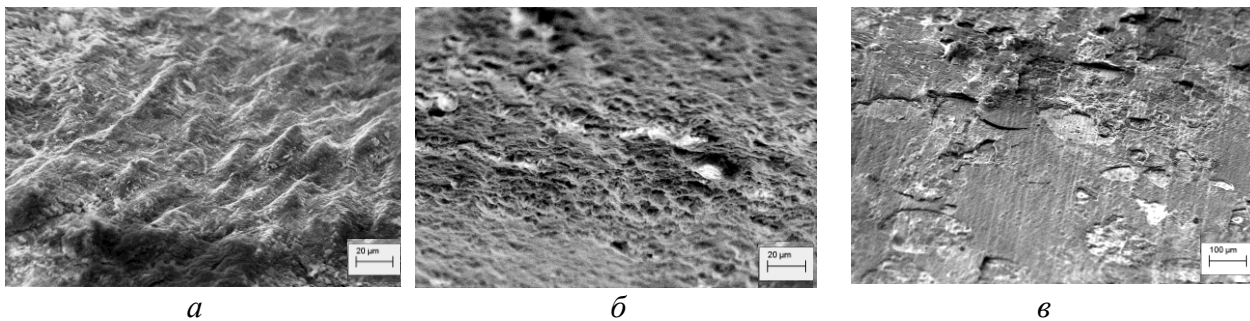


Рис. 2. Типові корозійні ураження в околі вхідної крайки лопатки біля хвостовика лопатки

Отже, проведений аналіз корозійно-ерозійних уражень на вихідній і вхідній крайках лопатки в прихвостовиковій зоні показали, що інтенсивність їх виникнення і поглиблення є істотно більшою біля вихідної крайки. Це створює передумови для виникнення по довжині пера лопатки багатьох осередків зародження тріщин від її вихідної крайки. Під дією циклічних навантажень з високою асиметрією циклу та конденсату, з розчиненими в нього корозійно-активними домішками, ці тріщини поширюються і формують корозійно-утомні макротріщини від опуклої поверхні лопатки, які навіть за стабільного режиму експлуатації можуть проростати в тіло лопатки. За жорстких умов навантаження під час експлуатації лопаток (особливо під час запусків та зупинок РНТ) поширення таких тріщин інтенсифікується і може спричинити передчасне руйнування лопатки.

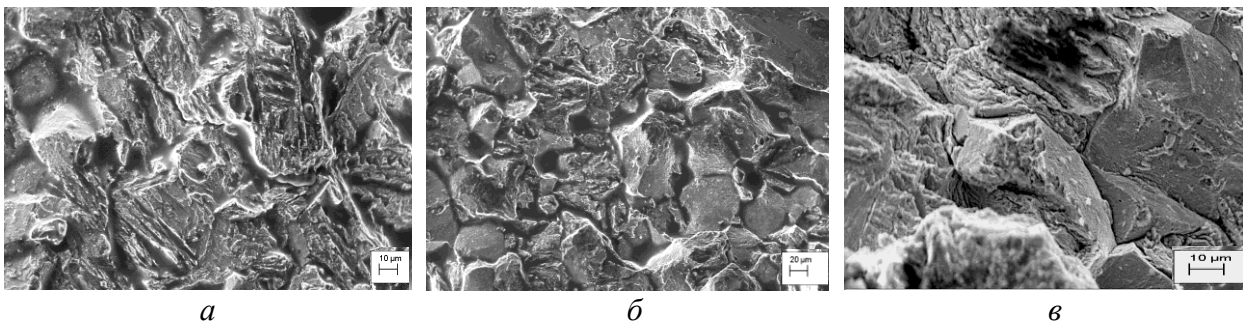


Рис. 3. Мікрофрактограми руйнування в околі вихідної крайки опуклої поверхні пера лопатки

Мікрофрактографічний аналіз зруйнованих поверхонь виявив, що у всіх зламах руйнування розпочиналося від вихідної крайки. За вищої роздільної здатності на початковому етапі руйнування спостерігали типове для корозійної втоми руйнування у вигляді суміші між- і

крізьзеренного руйнування. Це особливо яскраво видно, коли кристали високовідпущеного мартенситу формувалися в рамках великих за розмірами зерен аустеніту та під час руйнування розташовувалися перпендикулярно до фронту тріщини. Тоді вздовж їх меж спостерігаємо і вторинне розтріскування, яке відмінно їх окреслює, і дрібні глобулярні карбіди, що виникли під час високого відпуску сталі після гартування (рис. 3а). Великі пластинкові карбіди вздовж меж зерен, утворені на етапі гартування, а під час відпуску внаслідок коагуляції лише збільшилися за розмірами, спостерігали як поодинокі явище. Хоча саме вони спричинили такий низький опір поширення корозійно-втомного руйнування. Їх незначна кількість може бути доказом їх низького когезивного зв'язку з матрицею, через що вони відокремились від неї під час руйнування внаслідок вивільнення значної пружної енергії, запасеної лопаткою.

В міру просування по зламу в напрямі росту тріщини роль меж зерен у руйнуванні (особливо з боку опуклої поверхні пера лопатки) зростає (рис. 3б). Це супроводжується зростанням частки міжзеренного руйнування. Крізьзеренне руйнування пов'язане в основному з великими зернами, кристали високовідпущеного мартенситу в межах яких сприятливо орієнтовані до магістрального росту корозійно-втомної тріщини.

За вищої роздільної здатності чітко спостерігали і вторинне розтріскування вздовж меж зерен, яке чітко окреслювало міжзеренні фасетки, і пластинкові карбіди, або їх сліди на міжзеренних фасетках (рис. 3в). Причому, чим далі відходили від опуклої поверхні в тіло пера лопатки, тим яскравішими були ці особливості.

Подібні особливості руйнування відзначили і в околі увігнутої поверхні пера лопатки (рис. 4), а саме наявність крізь- і міжзеренного руйнування та вторинне розтріскування вздовж меж зерен (рис. 4а). Також виявили наявність дрібних ледь помітних глобулярних і значно більших подовгуватих за формою карбідів, розташованих як вздовж меж зерен, так і вздовж меж розділу кристалів високовідпущеного мартенситу (рис. 4б, в).

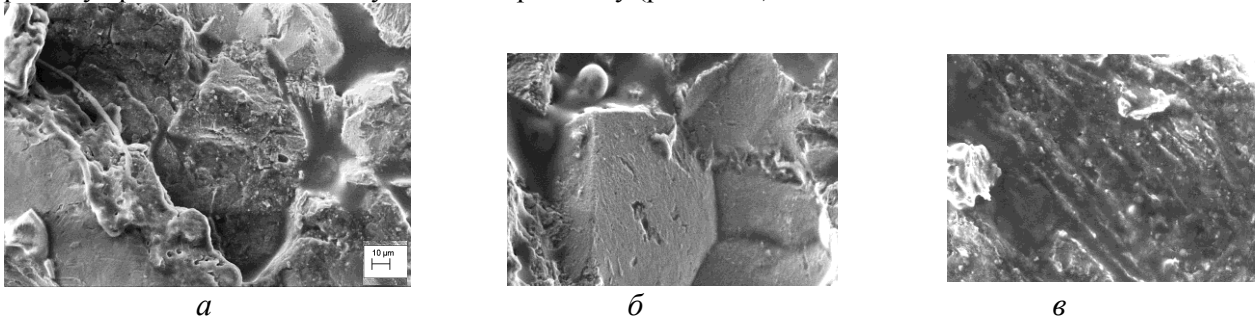


Рис. 4. Макро- і мікрофрактограми руйнування лопатки від увігнутої поверхні пера лопатки на віддалі 1, 5 мм від вихідної крайки

В міру подальшого просування в глибину зламу (від вихідної крайки лопатки) характер руйнування в центральній частині перерізу лопатки по її товщині залишається практично незмінним: суміш між- і крізьзеренного руйнування. На віддалі 7 мм від вхідної крайки рельєф руйнування в околі опуклої і увігнутої поверхонь пера лопатки теж незмінно між- і крізьзеренний (рис. 5). Відзначили лише різницю за розмірами зерен в околі цих поверхонь пера лопатки: міжзеренні фасетки біля опуклої поверхні менші, ніж біля увігнутої.

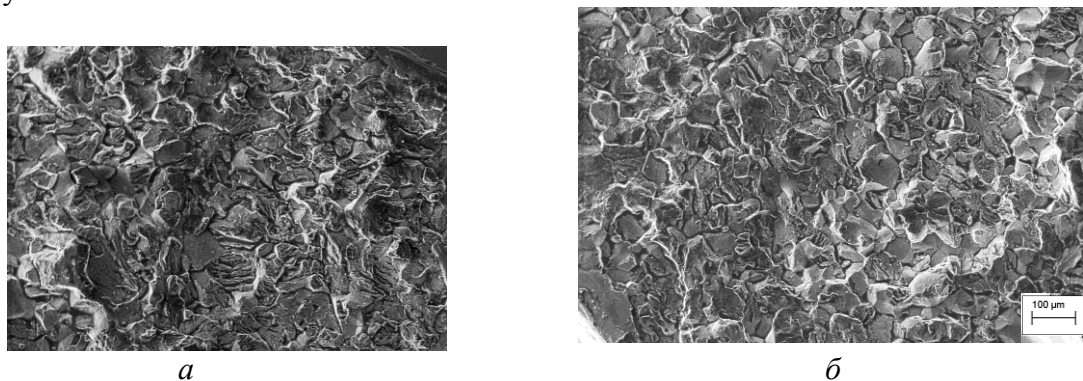


Рис. 5. Макрофрактограми руйнування лопатки від опуклої (а) і увігнутої (б) поверхонь пера лопатки на віддалі 7 мм від вихідної крайки

Такий характер руйнування (суміш між- і крізьзеренного) зберігався впродовж усього подальшого поширення руйнування в лопатці біля її хвостовика, і в центральній частині по її довжині аж до появи концентричних стосовно вихідної крайки макроміток на макрозламах.

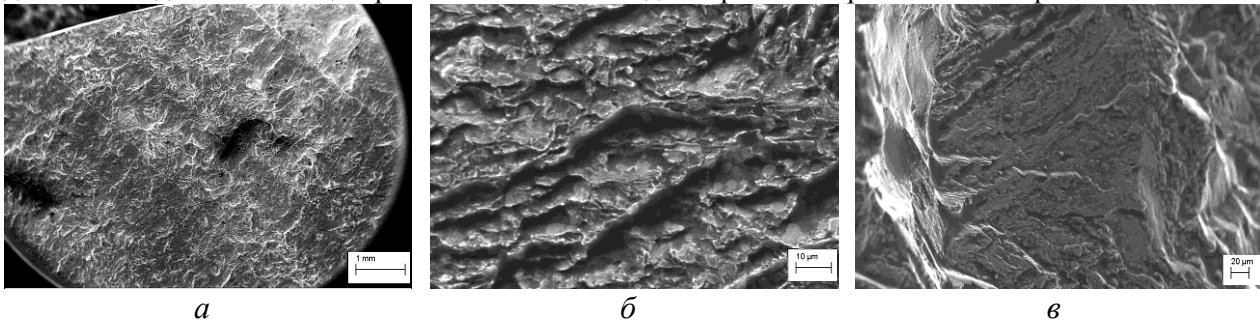


Рис. 6. Макрофрактограма на ділянці першої макромітки на зламі лопатки (а) та особливості корозійно-втомного росту тріщини на етапі формування макроміток на поверхні зламу

В зоні макроміток відзначили чітку зміну рельєфу зламів (рис. 6 а). Перед і після макроміток рельєф зламу перестає відповідати міжзеренному. І лише на самому гребені фіксували елементи міжзеренного руйнування, або, по крайній мірі, вторинне міжзеренне розтріскування (рис. 6 б). На основі аналізу всіх ділянок з макромітками прийшли до висновку, що внаслідок перевантаження лопатки, спричиненої зупинками і подальшими пусками ротора, внаслідок резонансу відбувалося швидке підростання тріщини по всій товщині пера лопатки внаслідок малоциклової втоми (рис. 6 б, в). Поки в її вершині не досягався критичний напружено-деформований стан для реалізації спонтанного руйнування, то під час стабільного режиму експлуатації тріщина підросла за умов низькоамплітудної корозійної втоми з елементами міжзеренного руйнування. Наступна зупинка і запуск ротора спричиняла повторний проскок тріщини за умов високоамплітудного навантаження внаслідок резонансу, а експлуатація за стабільного силового режиму залишала відмітку на зламі з елементами міжзеренного розтріскування. Так відбувалося до тих пір, поки довжина тріщини стала достатньою, щоб розмах деформацій лопатки під час зупинки ротора спричинив спонтанне її поширення за зсувовим механізмом.

Висновки. За результатами фрактографічного аналізу зламів виявили, що в лопатці від корозійних ушкоджень на опуклій поверхні в околі вихідної крайки зародилися тріщини. Вони поширювалися поперек пера лопатки. Основним механізмом руйнування зламів лопатки є суміш між- і крізьзеренного відколу, яка властива корозійно-втомному росту тріщин за багатоциклової втоми і характерна для нержавних сталей мартенситного класу. Відзначили, що навіть на ділянках крізьзеренного відколу руйнування відбувалося шляхом розмежовування суміжних голок високовідпущеного мартенситу з елементами вторинного розтріскування вздовж їх меж в глибину металу. Все це ознаки низького опору руйнування металу лопатки за дії циклічних навантажень і корозійного середовища.

1. Слабченко О.Н. Расчеты на прочность элементов ступени паровой турбины: Учеб. пособие / О.Н Слабченко. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2007. – 204 с.
2. Левин А.В. Прочность и вибрация лопаток и дисков паровых турбин / А.В. Левин, К.Н. Боршанский, Е.Д. Консон. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1981. – 710 с
3. Методические указания по предотвращению коррозионных повреждений дисков и лопаточного аппарата паровых турбин в зоне фазового перехода: РД 34.50.507-92. – М.: ВТИ. – 1993.
4. Zdzislaw Mazur Steam turbine blade failure analysis / Zdzislaw Mazur, Rafael Garcia-Illescas, Jorge Aguirre-Romano, Norberto Perez-Rodriguez // Engineering Failure Analysis. – 2008. – Vol.15. – P. 129–141.
5. Трухний А.Д. Теплофикационные паровые турбины и турбоустановки / А.Д. Трухний, Б.В. Ломакин. – М.: Типография "Новости", 2002. – 534 с.
6. Isobe Nobuhiro Micro-crack growth behavior and life in high temperature low cycle fatigue of blade root and disc joint for turbines / Nobuhiro Isobe, Shuhei Nogami // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2009. – №86. – P. 622–627.
7. Perkins K. M. Corrosion fatigue of a 12%Cr low pressure turbine blade steel in simulated service environments / K. M. Perkins, M. R.Barhe // International Journal of Fatigue. – 2005. – Volume 27. – P.1499-1508.
8. Ryuichiro Ebara Corrosion fatigue crack initiation in 12% chromium stainless steel / Ebara Ryuichiro // Material Science and Engineering. – 2007. – A 468–470.– P 109 – 113.
9. Томаров Г. В. Эрозия – коррозия конструкционных материалов турбин насыщенного пара / Г.В.Томаров // Теплоэнергетика. – 1989. – №7. – С. 33-38.

Стаття надійшла в редакцію 20.03.2015.