УДК 539.4

Дослідження причин експлуатаційного руйнування робочої лопатки турбіни газотурбінного агрегату компресорної станції

А. Я. Красовський, О. Є. Гопкало, І. О. Маковецька, О. О. Янко

Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

На основі структурного і фрактографічного аналізу злому робочої лопатки турбіни газотурбінного агрегату ГТК-10-2 компресорної станції встановлено, що на зародження первинної тріщини в робочій лопатці істотно вплинула структурна неоднорідність матеріалу технологічного походження, а підростання тріщини до критичних розмірів відбулося під дією експлуатаційних циклічних навантажень.

Ключові слова: газотурбінна установка, турбіна, робочі лопатки, руйнування, тріщина, структурна неоднорідність, фрактографія.

Газотурбінними установками (ГТУ) типу ГТК-10-2 укомплектована частина компресорних станцій (КС) магістральних газопроводів. Однією із головних причин виходу з ладу ГТУ є поломки робочих лопаток турбін високого (ТВТ) і низького (ТНТ) тиску.

Аналіз експлуатаційніх руйнувань елементів конструкцій, у тому числі таких, як робочі лопатки і диски ГТУ, свідчить про те, що більшість з них відбувається внаслідок утоми матеріалів, що зумовлено високою структурною чутливістю матеріалу до рівня експлуатаційних циклічних навантажень. Незважаючи на те що накопичено великий досвід щодо встановлення причин експлуатаційних поломок робочих лопаток турбін ГТУ (напр., [1–4]), кожен аварійний випадок потребує детального розгляду, оскільки йдеться про надійність роботи всієї системи в цілому.

У даній роботі проведено комплексні структурні і фрактографічні дослідження експлуатаційного злому (рис. 1) робочої лопатки 2-ї ступені ТНТ газотурбінного агрегату ГТК-10-2 компресорної станції з метою встановлення причин її руйнування, оскільки при аварійній зупинці ТНТ виявлено обрив однієї з робочих лопаток на роторі турбіни і, як наслідок, загин трьох інших у напрямку обертання ротора.

Робочі лопатки вищеназваного аварійного агрегату були виготовлені з штампованих заготовок сплаву ЭИ893 і пройшли термообробку (аустенізація при $T = 1020°C$, старіння при $T = 850°C$). За механічними властивостями вони відповідають ТУ 108.020.027-79.

Ротор ТНТ ГТК-10-2 напрацював із початку експлуатації 116454 мотогодини, а після останнього ремонту і повної перевірки до моменту аварії – ще 5992 мотогодини.

Аналіз хімічного складу металу робочої лопатки після експлуатаційного руйнування виконували на спектрометрі Spectrovac-1000. Металографічні дослідження структури під поверхнею руйнування проводили на оптичному інвертованому мікроскопі AXIOVERT-40 MAT, фрактографічний аналіз злому – на модернізованому растровому електронному мікроскопі РЕМ-100У.

© А. Я. КРАСОВСЬКИЙ, О. Є. ГОПКАЛО, І. О. МАКОВЕЦЬКА, О. О. ЯНКО, 2013

Хімічний склад металу пера робочої лопатки ТНТ зі сплаву ЭИ893

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni
0,03 ≤ 0,05	0,3 ≤ 0,6	0,1 ≤ 0,5	– ≤ 0,012	– ≤ 0,015	17,0 15,0...17,0	Основа Основа
Mo	Fe	W	Ti	Al	Ce	B
4,5 3,5...4,5	0,53 ≤ 3,00	10,0 8,50...10,0	1,55 1,30...1,60	1,45 1,40...1,70	– 0,025 *	– 0,01 *

Примітка. Над рискою наведено масову долю елементів (%) досліджуваного сплаву, під рискою – масову долю елементів (%) за ТУ 108.01.053-85; зірочкою відмічено значення за розрахунком.

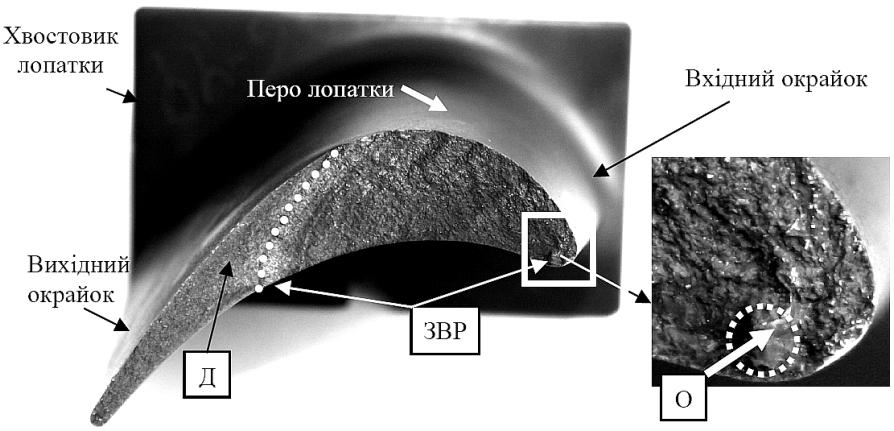


Рис. 1. Частина експлуатаційного злому пера робочої лопатки 2-ї ступені ротора турбіни низького тиску (*О* – осередок руйнування, *ЗВР* – зона втомного руйнування, *Д* – долом).

Як видно з даних таблиці, хімічний склад металу зруйнованого пера робочої лопатки з сплаву ЭИ893 відповідає вимогам ТУ 108.01.053-85.

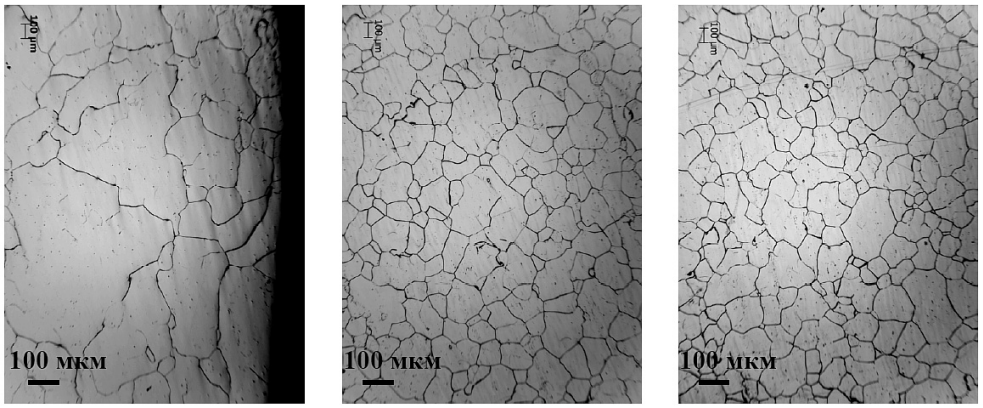
Мікроструктура матеріалу пера лопатки під поверхнею руйнування представляє собою поліедричні зерна γ-матриці (γ-твердий розчин) з відносно рівномірно розподіленою в ній дрібнодисперсною зміцнюючою γ'-фазою (рис. 2). За відсутності мікротріщин і порожнин спостерігається істотна структурна неоднорідність відносно розміру зерен γ-фази: від середньої величини 100...200 мкм (рис. 2,*б*,*в*) в основній масі пера до зерен розміром 500...900 мкм у зоні осередку руйнування (рис. 2,*а*).

Вимірювання твердості за Брінеллем (НВ) проводили на твердомірі типу Computest SC згідно з ГОСТ 9012-59. Твердість металу лопатки за Брінеллем складає 2607...2901 МПа.

Мікротвердість, виміряна на мікротвердомірі ПМТ-3 при навантаженні 0,98 Н, згідно з ГОСТ 9450-76 коливається в межах 2911...3724 МПа для основної частини мікрошліфа і 1568...2313 МПа в крупнозеренній зоні під осередком руйнування.

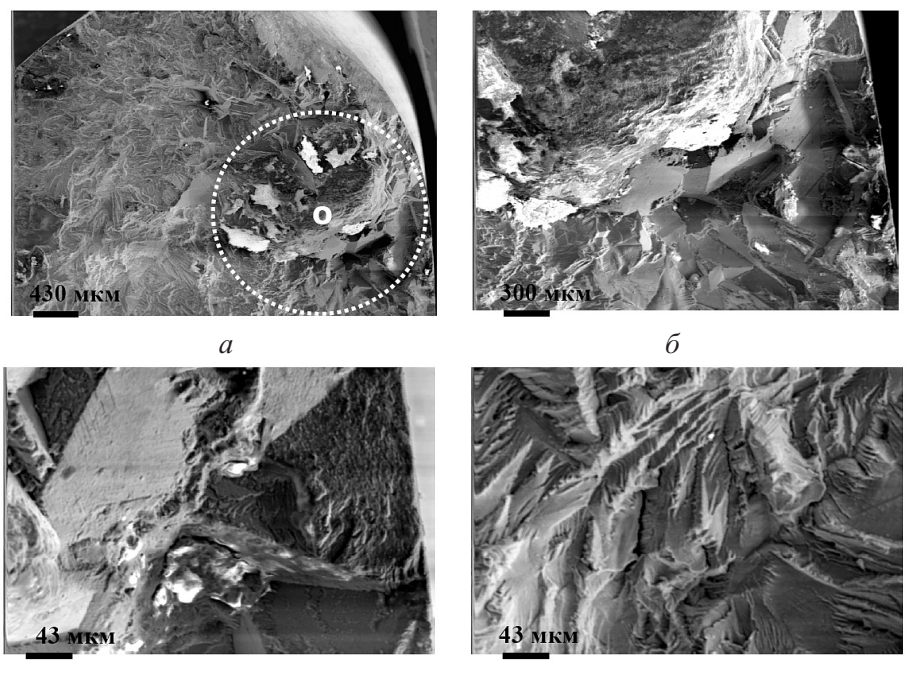
Фрактографічний аналіз досліджуваного злому проводили на макро- і мікрорівнях із метою отримання загальної картини процесу руйнування.

Руйнування лопатки відбулося по перу в поперечному напрямку на відстані приблизно 64,5 мм від полички хвостовика і мало втомний характер



а *б* *в*

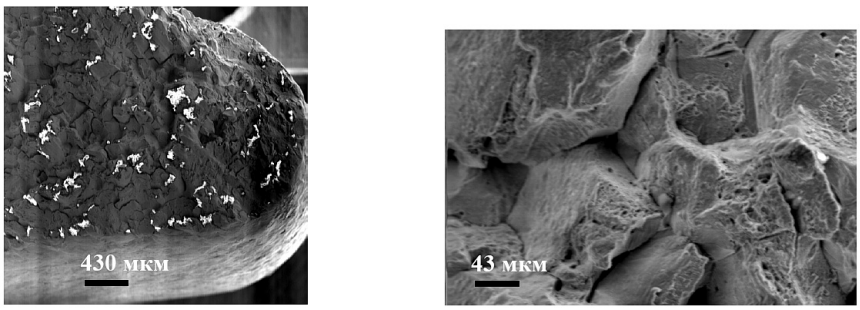
Рис. 2. Мікроструктура матеріалу пера робочої лопатки в поперечному перерізі під поверхею руйнування: *а* – крупнозеренна зона біля вхідного окрайка під осередком руйнування (точка *О* на рис. 1); *б*, *в* – типова дрібнозеренна структура під зоною втомного руйнування і зоною долому відповідно.



а *б* *в* *г*

Рис. 3. Мікрофрактограми експлуатаційного злому пера робочої лопатки зі сплаву ЭИ893 турбіни низького тиску зі сторони вхідного окрайка пера лопатки: *а* – область *О*; *б*, *в* – крихке міжзеренне руйнування (область *О* на рис. 3,*а*); *г* – квазікрихке внутрішньозеренне руйнування пера лопатки у втомній області.

(рис. 1), про що свідчать втомні макролінії. При дослідженні поверхні злому візуально та при 2–7-кратному збільшенні на поверхні злому біля вхідного окрайка лопатки можна спостерігати осередок руйнування (точка *О* на рис. 1), звідки розвивалась магістральна тріщина, границі фронту якої чітко окреслені майже концентричними, відносно осередка руйнування, лініями, пов'язаними



а *б*

Рис. 4. Мікрофрактограми експлуатаційного злому пера робочої лопатки ТНТ зі сплаву ЭИ893 зі сторони вихідного окрайка пера лопатки (зона долому).

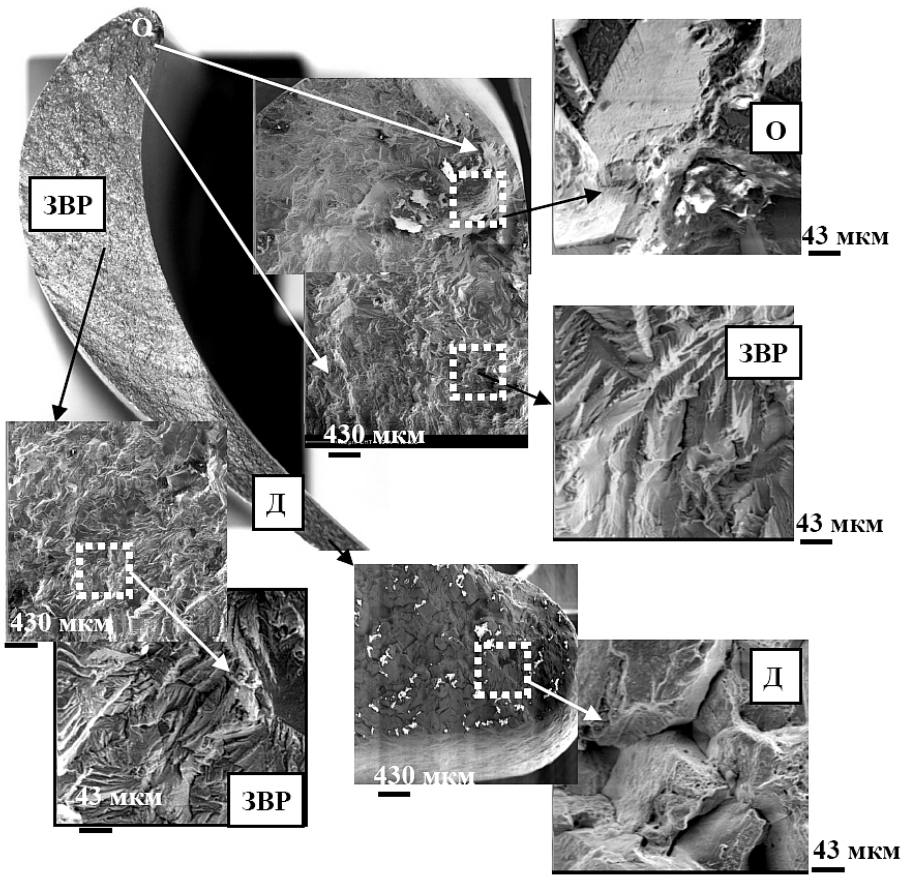


Рис. 5. Зміна мікромеханізмів руйнування пера робочої лопатки в результаті експлуатаційного руйнування.

зі зміною режимів навантаження. Лінії розмежовують зони кольорів мінливості. Наявність різних за величиною зон кольорів мінливості на поверхні злому вказує на перепад температур при стрибкоподібному русі магістральної тріщини, а сама їх поява свідчить про утворення тонкої окисної плівки на поверхні руйнування під впливом перепаду температур.

Як видно із порівняння результатів металографічних і фрактографічних досліджень, тріщина бере початок у крупнозеренній області матеріалу лопатки біля вхідного окрайка пера. В осередку руйнування спостерігаються крупні крихкі міжзеренні фасетки (рис. 3,*а–в*), а далі, у втомній області, руйнування розвивалось квазікрихко за внутрішньозеренним механізмом (рис. 3,*г*). Зона долому характеризується крихким міжзеренним руйнуванням з елементами в'язкості та вторинними міжзеренними тріщинами (рис. 4). Загальна картина зміни мікромеханізмів руйнування лопатки представлена на мікрофрактограмах експлуатаційного злому пера робочої лопатки (рис. 5).

На основі отриманих даних зазначимо, що осередок руйнування пера робочої лопатки турбіни низького тиску газотурбінного агрегату ГТК-10-2 знаходиться біля вхідного окрайка лопатки. Структурна неоднорідність (різнозеренність) металу пера лопатки, виявлена металографічними дослідженнями і підтверджена вимірюваннями мікротвердості, свідчить про локальне послаблення металу (у зоні "крупного зерна" під осередком руйнування), що могло спричинити зародження тріщини. Виникнення "зони крупного зерна" імовірно пов'язане з порушенням технології на стадії виготовлення та термообробки лопатки. Характер поширення тріщини від осередку руйнування типово втомний, про що свідчать особливості мікрорельєфу поверхні руйнування та концентричні лінії на поверхні злому, які фіксують проміжні положення фронту тріщини в процесі її поширення.

Таким чином, на зародження первинної тріщини робочої лопатки істотно вплинула структурна неоднорідність матеріалу технологічного походження, а підростання тріщини до критичних розмірів відбулось під дією експлуатаційних циклічних навантажень.

Р е з ю м е

На основании структурного и фрактографического анализа излома рабочей лопатки турбины газотурбинного агрегата ГТК-10-2 компрессорной станции установлено, что на зарождение первичной трещины в рабочей лопатке существенно повлияла структурная неоднородность материала технологического происхождения, а подрастание трещины до критических размеров произошло под действием эксплуатационных циклических нагрузок.

1. *Рафиков Л. Г.*, *Иванов В. А.* Эксплуатация газокомпрессорного оборудования компрессорных станций. – М.: Недра, 1992. – 237 с.
2. *Ревзин Б. С.*, *Ларионов И. Д.* Газотурбинные установки с нагнетателями для транспорта газа. – М.: Недра, 1991. – 303 с.
3. *Елисеев Ю. С.*, *Крымов В. В.*, *Малиновский К. А.*, *Попов В. Г.* Технология эксплуатации, диагностики и ремонта газотурбинных двигателей. – М.: Высш. шк., 2002. – 355 с.
4. *Бандалетов В.*, *Чернышев В.*, *Щербаков Г.* Статистика надежности газотурбинных газоперекачивающих агрегатов ОАО "Газпром" // Газотурбинные технологии. – 2002. – № 1. – С. 25 – 27.

Поступила 10. 05. 2012