

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДЕГРАДОВАНОГО ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ТА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ НА ЗАЛИШКОВИЙ РЕСУРС ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ГТД

**К.П. Буйських, Є.О. Задворний, С.Г. Киселевська, Л.В. Кравчук,
М.М. Феофентов**

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

The paper shows the need to consider the properties degradation of the most loaded surface material layers due to cyclic action of high-temperature media, which is significant at the stages up to thermal fatigue crack initiation and propagation, resulting in the difficulty regarding the standard fracture mechanics criteria use in the process of selection of limiting state models and calculation of the TSSS kinetics in the methods for prediction of GTE elements residual lifetime.

Дослідження пошкодження поверхневого шару матеріалу найбільш навантажених елементів конструкцій газотурбінних двигунів (ГТД) при термоциклічному навантаженні [1, 2] показали суттєві зміни структури й елементного складу матеріалу цього деградованого шару (ДШ), як на стадії до появи тріщин термічної втоми, так і в усті та вершині тріщин у процесі їх поширення.

Інтенсивність досліджуваних змін засвідчила про необхідність їх урахування при розрахунках теплового та напружено-деформованого стану (ТНДС) високотемпературних елементів конструкцій газотурбінних двигунів. Розрахункова оцінка ТНДС ґрунтувалася на експериментальних даних про кінетику теплового стану моделей лопаток ГТД та фізичних дослідженнях кінетики структурного стану матеріалу, що забезпечило можливість проведення масштабних числових досліджень з урахуванням значимості деградованих шарів і утворених тріщин термічної втоми. Проведені розрахунки вказали на необхідність вирішення таких важливих завдань, як отримання коректних даних про властивості матеріалу деградованого шару і вдосконалення методологічних підходів, пов'язаних з визначенням реальних полів залишкових напружень в елементі конструкції, обумовлених відмінностями властивостей ДШ і основного матеріалу, а також експлуатаційними і технологічними чинниками. Результати дослідження теплового і напружено-деформованого стану моделей лопаток ГТД з пошкодженим поверхневим шаром показали [3, 4], що величини напружень, викликані утворенням деградованого шару, вносять істотний внесок в напружений стан і повинні враховуватися при проведенні розрахунків, пов'язаних з визначенням міцності і довговічності елементів конструкцій при оцінці їх залишкового ресурсу.

Такий висновок впливає із аналізу базових процедур, що визначають можливості подальшої експлуатації елемента конструкції взагалі, прийнятності проведення відновлювального ремонту або його заміни. Ґрунтуючись на аналізі літературних даних і нормативних документах [1-3], а також на розроблених оригінальних методиках, визначення залишкового ресурсу елементів конструкцій енергетичного обладнання, а, за необхідності, поетапного вибору ремонтної технології, можна представити у вигляді схеми (рис. 1).

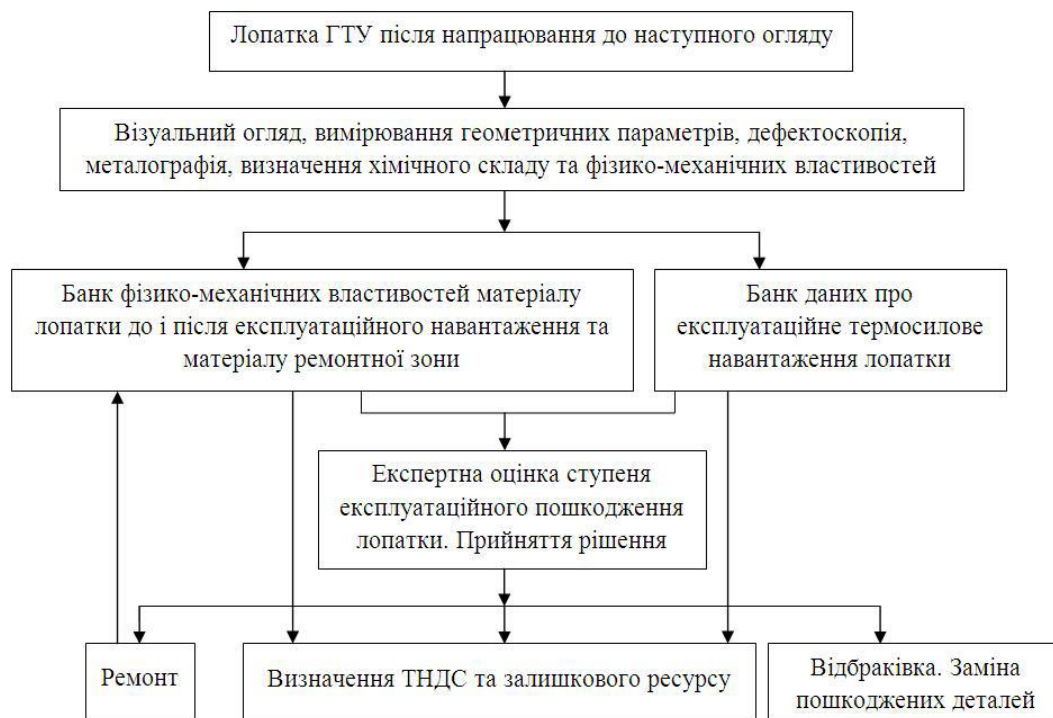


Рис. 1. Структурна схема етапів визначення залишкового ресурсу

Основні засади прогнозування залишкового ресурсу матеріалу конструкційних елементів енергетичного обладнання передбачають знання на певних стадіях експлуатації змін структури і властивостей матеріалу, наявність методів їх обліку при визначенні напружено-деформованого і граничного стану конструкції. Також особливо значущим при цьому є розробка методологічних можливостей для оптимального вибору різних відновлювальних та ремонтних технологій і отримання базової інформації, необхідної для оцінки ресурсу після їх реалізації. Тому вирішення питань про необхідність використання тих чи інших ремонтно-відновлювальних технологій для конструкцій енергетичного обладнання завжди пов'язується з дослідженням різних стадій процесів пошкодження.

Тут і надалі викладений матеріал стосується лопаткового апарату турбіни, як найбільш навантаженого елемента, що в багатьох випадках визначає ресурс газотурбінної установки (ГТУ). Суть методики полягає у визначенні послідовності процедур обґрунтованого прийняття рішень про працездатність, ремонтпридатність і прогнозування ресурсу лопатки ГТУ, що включає в себе її життєвий і експлуатаційний цикли між установкою на диск і відбраковкою та зняттям її з експлуатації внаслідок не ремонтпридатності або економічної недоцільності. За цією схемою лопатка ГТУ при черговому огляді проходить обстеження ступеню експлуатаційного пошкодження з оцінкою змінених в процесі експлуатації фізико-механічних характеристик матеріалу, зокрема деградації властивостей поверхневих шарів, і визначенням ТНДС у найбільш напружених зонах, з урахуванням реального спектру експлуатаційних навантажень. На підставі цього робиться висновок про вибір технології ремонту, процедури її застосування та визначення ефективних характеристик, які є вихідними для встановлення залишкового (реального) ресурсу відновленої лопатки [5]. Саме про певні особливості та застереження щодо методів реалізації розрахункових та експериментальних підходів йдеться у даній роботі.

Основною метою цієї роботи є розробка методів та дослідження впливу чинників, що визначають кінетику накопичення експлуатаційних пошкоджень та є суттєвими при реалізації методології визначення реального ресурсу елементів конструкцій стаціонарних і транспортних енергетичних установок. Ці методи включають в себе: методи дослідження пошкодження поверхневого шару матеріалів екстремально навантажених елементів

конструкцій; методи відновлення пошкоджених зон; методи визначення фізико-механічних характеристик цих пошкоджених матеріалів; методи розрахунку термонапружено-деформованого стану пошкоджених в результаті експлуатації елементів конструкцій і знаходження взаємозв'язку між ТНДС, пошкодженнями поверхневих шарів та залишковим ресурсом.

Основні результати досліджень з проблем пошкодження матеріалів, деградованих поверхневих шарів, кінетики макроруйнування конструкційних елементів досліджувалися на клиновидних зразках, як моделях кромки лопаток ГТД. Вони пройшли цикл випробувань на газодинамічних стендах ІПМіц ім. Г.С.Писаренка НАН України за умов циклічного термічного навантаження, на яких моделювалися умови роботи газотурбінного двигуна на нестационарних режимах експлуатації [1, 2, 3]

Результати досліджень деградаційних процесів за термовтомних випробувань в залежності від рівня напружень, температур, тривалості та інших чинників частково висвітлені в роботах [1, 2]. У представленій роботі розглядається стадія пошкоженості матеріалу елемента конструкції, яка характеризується наявністю тріщин термічної втоми, і акцентується увага на процесах в різних зонах тріщини. Особливість досліджень полягала в тому, що аналізувалися тріщини термічної втоми, які виникли в різних зонах клиновидного зразка, що відрізняються різним термонапруженим станом деталі, а отже, різним ступенем пошкодження деградованого шару та кінетикою тріщин термічної втоми в залежності від числа циклів (напрацювання) після їх виникнення. Порівняння результатів проведена за показником, який може бути ідентифікований з іншими показниками міцності.

Про зміну властивостей матеріалу елемента конструкції ГТД оцінювали за результатами вимірювання мікротвердості поблизу і на відстані від тріщини термічної втоми. Нижче наведені дані вимірювання мікротвердості у зоні тріщин термічної втоми на зразку із сплаву ЧС70ВІ після 5800 циклів теплових змін. Тріщина 1 довжиною 7 мм виникла після 1500 циклів в найбільш термонапруженій центральній зоні зразка, а тріщина 2 довжиною 3,8 мм після 1750 циклів – в периферійній і менш термонапруженій зоні. Схема розташування тріщин термічної втоми на клиновидному зразку та їх кінетика показана на рис. 2.

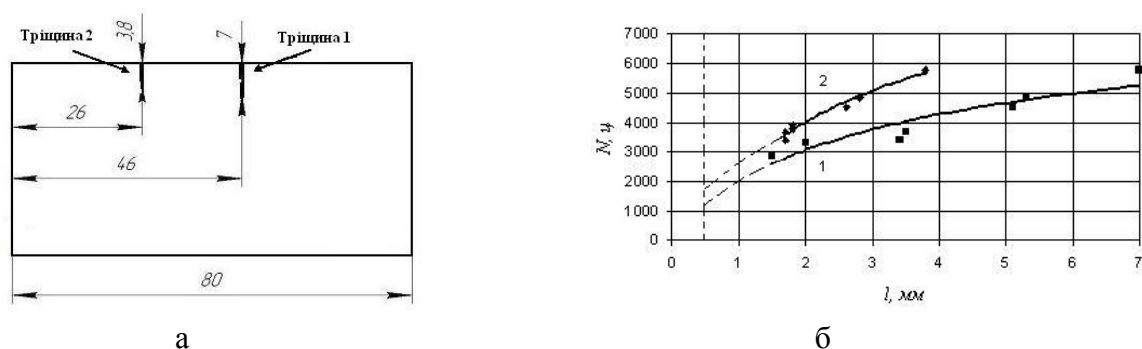


Рис. 2. Схема розташування тріщин термічної втоми на клиновидному зразку (а) із сплаву ЧС70ВІ та їх кінетика (б)

Індентування мікрошліфів проводилося по лініях перпендикулярних тріщині в напрямку від сплаву до тріщини. Кожна із ліній знаходилася на різній відстані від поверхні зразка. Аналогічний спосіб індентування був на кожній із двох тріщин. Схема індентування для кожної із двох тріщин, а також значення мікротвердості в усті (а) та вершині (б) двох тріщин (1 і 2) показана на рис. 3.

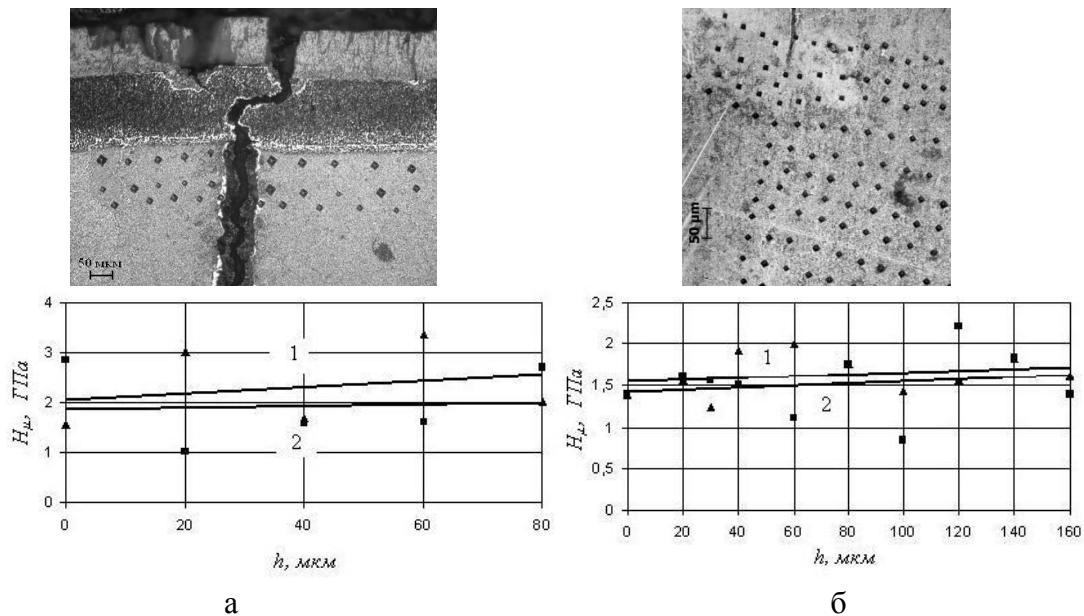


Рис. 3. Схема індування та значення мікротвердості в усті (а) та вершині (б) двох тріщин (1 і 2) на клиновидному зразку із сплава ЧС70ВИ

Аналіз наведених на рис. 3 даних про мікротвердість свідчить про наступне. Значення мікротвердості для тріщини 1 вищі порівняно з тріщиною 2. Усереднені дані свідчать, що значення мікротвердості вищі для тріщини 1, порівняно з тріщиною 2. Це спостерігається, як для устя, так і для вершини. Для устя характерно зниження мікротвердості з віддаленням від тріщини. У вершині тріщини значення мікротвердості нижчі, ніж для устя. Наведені дані можуть свідчити про те, що в усті тріщини 1 порівняно з тріщиною 2 відбуваються більш суттєві процеси пошкодження матеріалу клиновидного зразка, що викликано дією більш високих температур та термічних напружень, що властиві для центральної зони конструкційного елемента.

Література

1. Буйских К.П., Кравчук Л.В., Киселевская С.Г., Задворный Е.А., Феофентов Н.Н. Кинетика и механизмы деградации поверхностного слоя элементов конструкций ГТД при термоциклическом нагружении в процессе зарождения и роста трещин термической усталости // Пробл. прочности. – 2016. – № 6. – С.64-72.
2. Л.В.Кравчук, К.П.Буйських, С.Г.Киселевська, Є.О.Задворний, А.Ю.Лебедин Дослідження пошкодження поверхневого шару елементів конструкцій ГТД при термоциклічному навантаженні до і після появи тріщин термічної втоми // В кн. Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування. Праці конференції, Тернопіль, 21-24 вересня 2015 р., С.202-204.
3. Задворний Є.О., Кравчук Л.В., Буйских К.П., Киселевська Г., Феофентов Н.Н., Лебедин А.Ю. Анализ влияния поврежденности материала на напряженно-деформированное состояние лопаток газотурбинных двигателей // Пробл. прочности. – 2015. – № 6. – С.23-30.
4. Л.В.Кравчук, Є.О.Задворний, К.П.Буйських, А.Ю.Лебедин, М.М.Феофентов. Моделювання напружено-деформованого стану елементів конструкцій газотурбінних двигунів з урахуванням їх пошкоджуваності // В кн. Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування. Праці конференції, Тернопіль, 21-24 вересня 2015 р., С.133-136.
5. Г.В.Цыбанев, Б.А.Ляшенко, К.П.Буйских, А.И.Новиков. Оценка усталостного ресурса деталей на разных стадиях эксплуатационного повреждения и после последующего применения ремонтных технологий // У кн.: Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. Збірник наукових статей, Київ, ІЕЗ ім. Є.О.Патона, 2012 р., С.537-541.