

МАТЕРІАЛОЗНАВЧІ АСПЕКТИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО РУЙНУВАННЯ ПОВІТРЯНОГО СТАРТЕРА КОНВЕРТОВАНОГО ДВИГУНА ГАЗОКОМПРЕСОРНОЇ СТАНЦІЇ

¹Г.В. Кречковська, ²А.Б. Мицик, ¹О.З. Студент

¹Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5;
e-mail: student@ipm.lviv.ua

²Управління магістральних газопроводів "Львівтрансгаз", 79026, м. Львів, вул. І. Рубчака, 3;
e-mail: mitcik-ab@utg.ua

Встановлено, що пошкодження корпусу повітряного стартера конвертованого двигуна газокompresорної станції спричинене руйнуванням диску однієї з крильчаток. Макро- та мікрофрактографічним аналізом поверхонь зламів цього диску виявлено, що руйнування розпочалося від концентраторів напружень на дні канавок шлицьового з'єднання, в перерізі диску, ослабленому отвором для штифта, яким синхронізували обертання обох крильчаток стартера. Показано типовий для малоциклової втоми з високою асиметрією циклу навантаження змішаний характер докритичного поширення тріщини з формуванням розеток крихких відколів, спричинених руйнуванням інтерметалідів типу Al_9FeNi та пластичним руйнуванням матричної фази в перетинках між ними.

Ключові слова: фрактографія, крильчатка, напруження, малоциклова втома.

Установлено, что повреждение корпуса воздушного стартера конвертированного двигателя газокompresорной станции обусловлено разрушением диска одной из крыльчаток. В результате макро- и микрофрактографического анализа поверхностей изломов этого диска обнаружено, что разрушение началось от концентраторов напряжений на дне канавок шлицевого соединения в сечении диска, ослабленном отверстием для штифта, которым синхронизировали вращение обеих крыльчаток стартера. Показан типичный для малоциклового усталости с высокой асимметрией цикла нагрузки смешанный характер критического роста трещины с формированием розеток хрупких сколов, вызванных разрушением интерметаллидов типа Al_9FeNi и пластичным разрушением матричной фазы в перемычках между ними.

Ключевые слова: фрактография, крыльчатка, напряжение, малоцикловая усталость.

It has been established that the damage of the air starter housing of the converted gas compressor engine is caused by the destruction of the disk of one of the impellers. Macro- and microfractographic analysis of the fracture surfaces of this disc has revealed that the destruction began with stress concentrators at the bottom of the grooves of the splined joint, in the section of the disk, weakened by the hole for the pin, by means of which the rotation of both impellers of the starter is synchronized. The critical crack growth, which is typical for low cycle fatigue with high asymmetry of the load cycle is formed with the formation of cleavage facets caused by the fracture of intermetallics such as Al_9FeNi and the ductile fracture of the matrix phase in the bridges between them.

Key words: fractography, impeller, stress, low cycle fatigue.

Обладнання компресорних станцій мережі магістральних газогонів призначене для тривалої експлуатації. Однак, на сьогодні вже кожен третій перепомпувальний агрегат в Україні відпрацював свій моторесурс [1].

Відповідно зростає ризик відмов, в тому числі з неконтрольованим руйнуванням елементів конструкції. Мінімізувати такі ризики можна шляхом системного аналізу досвіду експлуатації обладнання газокompresорних станцій, експертних висновків щодо причин експлуатаційних пошкоджень та прийнятих рішень і рекомендацій для їх недопущення у майбутньому. Мета дослідження – встановити причини неконтрольованого руйнування корпусу повітряного стартера ВС-12 для запуску конвертованого двигуна дотискувальної компресорної станції та низки обертових елементів всередині нього та сформулювати рекомендації стосовно підвищення їх ресурсу.

Об'єкт та методики досліджень

Під час експлуатації повітряного стартера, який використовують короткочасно для запуску мотора помпи, більшість його елементів підлягають циклічному навантаженню. В момент його запуску в шлицьовому з'єднанні ротора і дисків крильчаток виникають високі локальні навантаження, спричинені опором обертанню елементів редуктора, що передає крутний момент на вал мотора помпи. Результати візуального обстеження всіх зруйнованих елементів і аналіз можливих причин їх руйнування підтвердили припущення про ключову роль диску крильчатки у пошкодженні корпусу повітряного стартера. Особливості конструкції крильчатки та елементів, що збереглися після руйнування, розкриває рис. 1

З опису технічних характеристик стартера відомо, що його ресурс – близько 300 пусків, максимальна швидкість обертання ротора – $75...83,3 \text{ c}^{-1}$, а допустимий час роботи після пу-

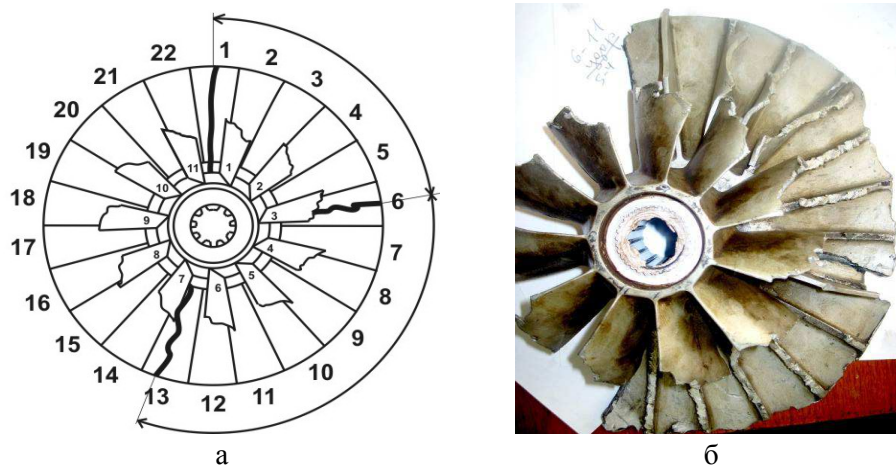


Рисунок 1 – Схема розташування лопаток на обох крильчатках стартера та реконструкція розташування їх фрагментів, які збереглися після експлуатаційного пошкодження



Рисунок 2 - Фрагменти поверхні зламу (а, б) та загальний вигляд (в) диску крильчатки із зародженням руйнування від канавки шліцьового з'єднання (а) та поширенням руйнування до злиття фронту тріщини з отвором для штифта та подальшим поширенням тріщини єдиним фронтом, овальний слід від чергової зупинки якого чітко видно на зламі (б)

ску не перевищує 120 с. Звідси впродовж планового ресурсу максимальна кількість циклів навантаження крильчатки могла досягти не більше $2,7 \dots 3,0 \cdot 10^9$, що загалом відповідає багатоцикловій утомі. Водночас реальна кількість циклів навантаження нижча, оскільки фактичні кількість пусків, швидкість обертання ротора і тривалість роботи були меншими. Тому вважали, що метал диску стартера циклічно навантажувався в області малоциклової втоми або на переході між мало- та багатоцикловою втомою.

Хімічний склад металу визначали на плоско-паралельних шліфованих призматичних зразках 20×20 мм з використанням оптичного іскрового атомно-емісійного спектрометра SPECTROMAX LMF 0,5.

З механічних властивостей оцінювали твердість HB металу, застосовуючи, в основному, ультразвуковий переносний універсальний твердомір NOVOTEST. Частково результати перевіряли на плоско-паралельно шліфованих зразках на стаціонарному твердомірі TP-5006-02.

Металографічні дослідження та мікрофрактографічні особливості експлуатаційного руйнування дослідили на сканівному електронному мікроскопі EVO-40XVP із системою спектрального мікроаналізу INCA Energy 350.

Макрофрактографічні особливості руйнування диску крильчатки

Першочергове завдання полягало у встановленні місця зародження та докритичного (субкритичного) росту тріщини як першопричини подальшої втрати цілісності конструкції. Взяти до уваги, що неконтрольоване руйнування супроводжується порівняно інтенсивною пластичною деформацією, оскільки відбувається за високого (критичного) рівня напружень. Це не властиво руйнуванню на етапі докритичного росту тріщини, що відбувається за дії значно нижчих напружень.

Останньому критерію відповідав лише злам диску крильчатки в перерізі, ослабленому отвором для фіксування штифта (рис. 2). Цим підтвердили, що його руйнування стало першопричиною пошкодження стартера. Спостерігали низькорельєфний злам, на якому практично відсутні губи зрізу, а малорозвинений його профіль відповідав макроособливостям зламу, властивим втомному росту тріщини.

Це дало підстави зробити висновок, що крильчатка зруйнувалася внаслідок зародження втомної тріщини в зоні локалізації напружень в околі отвору для фіксування штифта. Тріщина зародилося від канавки шліцьового з'єднання, розташованої навпроти отвору для штифта, під кутом до основного зламу, що відповідає кла-

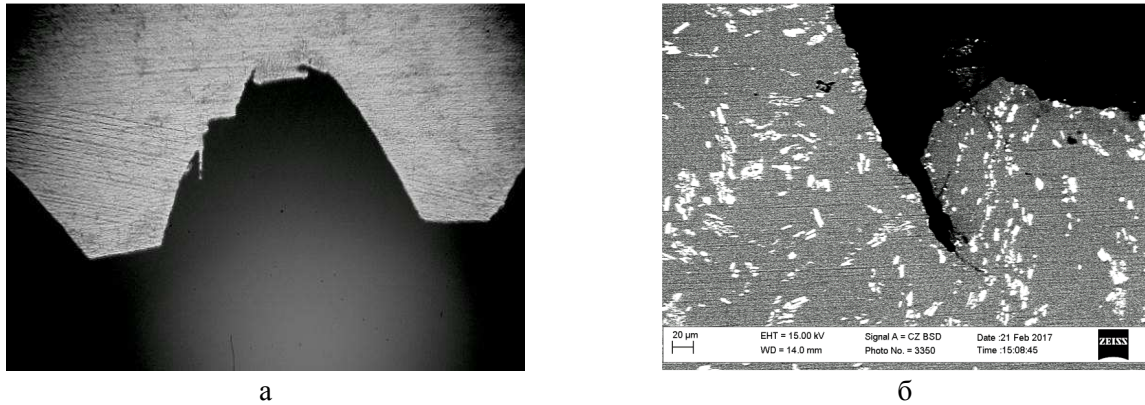


Рисунок 3 – Сліди контактування диска крильчатки з ротором в зоні їх шліцьового з’єднання (а) та утомна тріщина від вершини однієї з шліцьових канавок диска крильчатки як від концентратора напружень (б)

сичній закономірності зародження втомної тріщини від концентратора напружень у напрямі дії максимальних деформацій (рис. 2а). За певної довжини тріщини відбулася переорієнтація поверхні руйнування і ріст тріщини продовжився в радіально орієнтованому перерізі диска, а поверхня зламу стала нормально орієнтованою до розтягувальних напружень. В міру подальшого поширення тріщини на поверхні зламу з’явилися характерні для втоми овалні макросліди фронту тріщини під час призупинення її росту (рис. 2б). Поступово тріщина поширилася аж до досягнення критичного рівня напруженого стану в її вершині з наступним неконтрольованим руйнуванням крильчатки. Злам на периферійній частині диска відповідав ознакам, властивим зоні доламу, про що свідчили затерті губи витягування в околі бокових поверхонь диска та шевронний рельєф в центральній частині зламу диска по його товщині (рис. 2в). В подальшому відокремленні фрагменти продовжували обертатися всередині стартера з високою швидкістю і поступово руйнували інші деталі статера внаслідок ударного контактування з ними.

Хімічний склад і властивості сплаву диска крильчатки

Визначили вміст елементів у сплаві диска (мас. %: 2,61 Mg; 0,71 Si; 0,1 Ti; 0,04 Mn; 0,83 Fe; 1,0 Ni; 1,85 Cu; 0,03 Zn; 92,83 Al). Цей склад найближче відповідає сплаву системи Al-Cu-Mg і згідно з ГОСТ 4784 – це деформівний жароміцний алюмінієвий сплав АК-4 (1140), до складу якого можуть входити у мас. %: (1,4-1,8) Mg; <0,8 Si; (0,05-0,12) Ti; <0,2 Mn; (1,1-1,6) Fe; (1,0-1,5) Ni; (1,9-2,5) Cu; 0,03 Zn; 92,83 Al. Такі сплави деформують в гарячому стані і використовують для виготовлення поршнів, головок циліндрів та лопаток компресорів турбореактивних двигунів. Завдяки взаємодії заліза і нікелю у ньому утворюються часточки фази Al_3FeNi , що не схильні до коагуляції і підвищують його жароміцність. Загалом до штамповок із сплавів АК застосовують термічне оброблення у вигляді гартування від температури 525-535° С з наступним штучним старінням впродовж 9-12 год за

температури 185-195° С. Це розширює температурний діапазон експлуатації сплаву до 250° С.

В літературі повідомляється про результати оцінювання механічних характеристик сплаву АК-4. Так, за даними [2] границі міцності і плинності цього сплаву становлять відповідно 411 і 343 МПа, відносні видовження і звуження – 10 і 20 %, а твердість – 120 НВ. А циклічна міцність деформованих алюмінієвих сплавів за симетричного згину на базі $5 \cdot 10^8$ циклів загалом змінюється від 35 до 150 МПа.

Відзначили, що твердість аналізованого сплаву становить 85...95 НВ, що дещо нижче за наведене в літературі для алюмінієвого сплаву АК-4 значення. Оскільки твердість металу зазвичай безпосередньо пов’язана з характеристиками втомної міцності, то можна також припустити їх зниження для дослідженого сплаву.

Металографічні дослідження металу в радіальному перерізі крильчатки

Проаналізувавши канавки шліца в радіальному перерізі крильчатки, виявили докази поступового зношування металу в зоні контактування сталевого ротора з диском із алюмінієвого сплаву внаслідок фретинг втоми (рис. 3а). Порушення вимог щодо їх центрування (контакт сталевих зубів шліцьового з’єднання відбувався приблизно на віддалі 1/3 від дна шліцьових канавок в алюмінієвому диску) підвищило питомий тиск на поверхні контактування. В міру зростання величини зношування постійно збільшувалися відносні переміщення контактуючих у шліцьовому з’єднанні елементів і, відповідно, створювалися передумови для низькоамплітудної високочастотної вібрації диска. За її впливу від вершин шліцьових канавок зароджувалися тріщини, які поступово проростали у тіло диска (рис. 3б). Внаслідок цього змінювалася частота власних коливань крильчатки, що підвищувало амплітуду її коливань внаслідок зростання рівня вібрації і сприяло поширенню втомних тріщин, що зародилися в місцях підвищеної концентрації напружень.

На основі рентгенівського спектрального мікроаналізу визначили елементний склад матриці і включень. На фоні твердого розчину

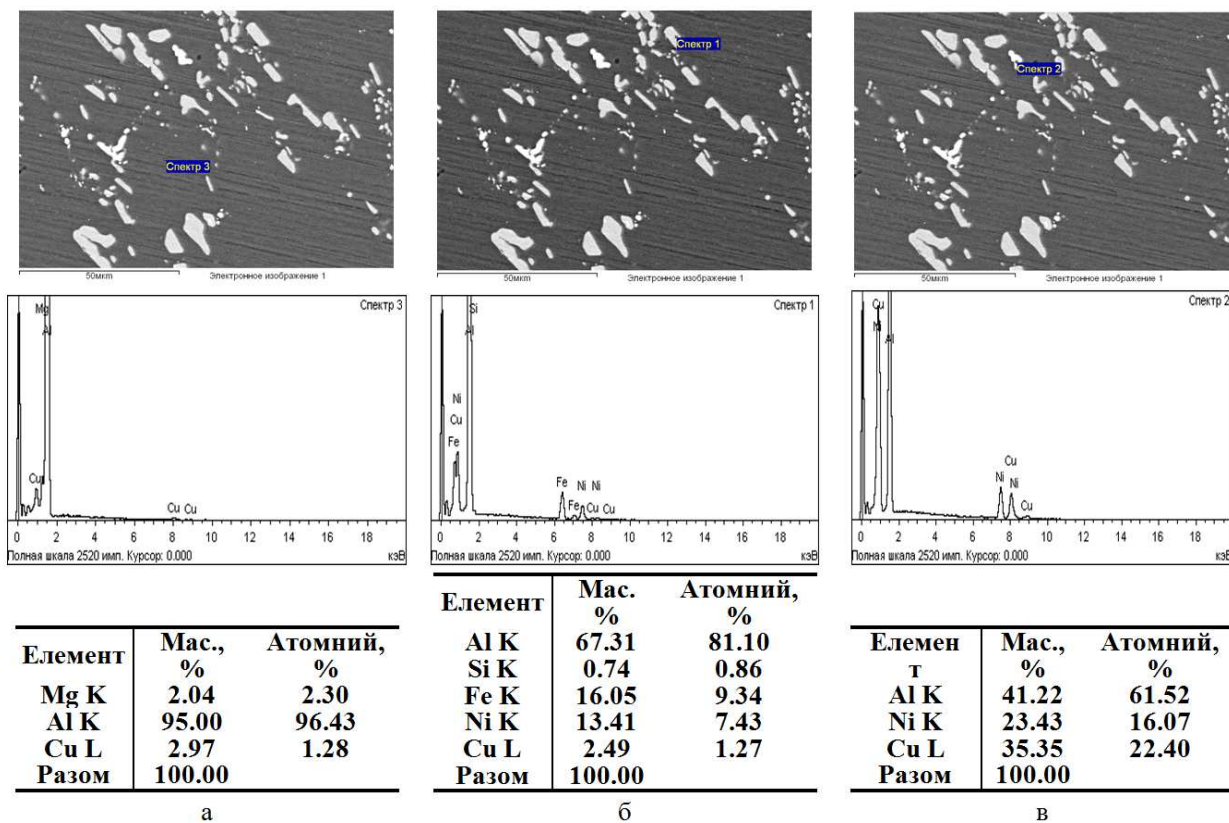


Рисунок 4 – Структура, спектральний аналіз та склад твердого розчину Mg і Cu в Al матриці, яка зміцнена нанорозмірними виділеннями фази CuAl₂ (а), інтерметалідами типів Al₉FeNi (б) та Cu(Ni)Al₂ (в)

Mg і Cu в Al-матриці (рис. 4а) в мікроструктурі сплаву виявили два типи інтерметалідів. Переважали видовжені (до 10 мкм завдовжки) включення типу Al₉FeNi з гострокутною морфологією (рис. 4б). Інтерметаліди типу Cu(Ni)Al₂ траплялися в структурі сплаву рідше, були дрібнішими за розмірами (до 7 мкм завдовжки) і мали менш гострокутну морфологію (рис. 4в). Обидва типи інтерметалідів не розчинилися у твердому розчині Mg і Cu в Al матриці під час нагрівання крильчатки перед гартуванням і тому істотно не впливали на зміцнення сплаву під час наступного етапу термічного оброблення (внаслідок старіння таких сплавів зазвичай формуються нанорозмірні виділення фази типу CuAl₂). Можливо саме цим зумовлена порівняно дещо занижена твердість сплаву. Крім того, за умов циклічного навантаження такі видовжені інтерметаліди з чітко вираженою гострокутною геометрією могли виконувати роль структурних концентраторів напружень і, відповідно, сприяти втомному руйнуванню як на стадії зародження, так і на стадії поширення втомної тріщини [3-6].

Мікрофрактографічні особливості руйнування диску стартера

За порівняно невисокої роздільної здатності на фрактограмах чітко ідентифікували мікросліди у вигляді майже паралельних овальних гребенів на місцях зупинок поширення тріщини, які візуалізували етапи поширення фронту

руйнування від канавки шліцьового з'єднання (рис. 5). Таких ділянок з серпоподібними зонами зародження тріщин було декілька по довжині шліцьової канавки, що є ознакою існування декількох осередків зародження руйнування.

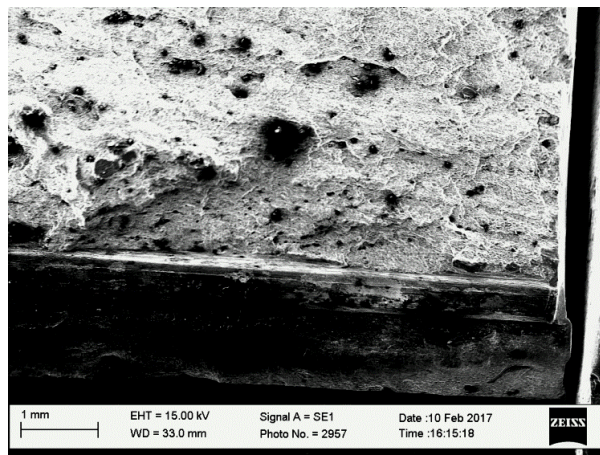


Рисунок 5 – Типова фрактограма з ділянки зародження руйнування в диску крильчатки від канавки шліцьового з'єднання (знизу) навпроти отвору для штифта

При цьому відзначили, що чим далі від отвору для штифта (як додаткового концентратора напружень) розташовані ці осередки, тим більша за розмірами зона зародження і менша кількість слідів від зупинок поширення руйнування виявлялися на зламі. Це ознака того, що

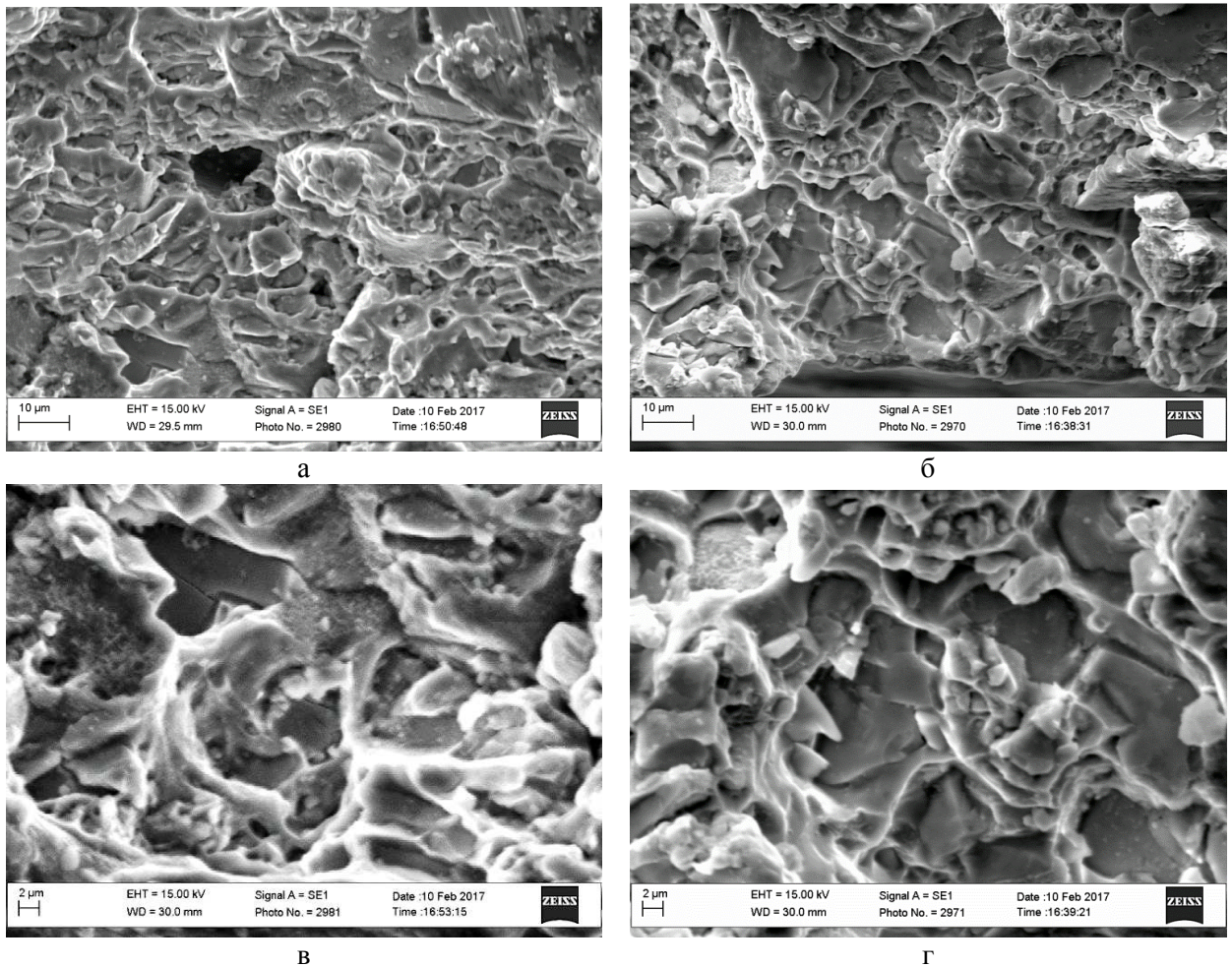


Рисунок 6 – Мікрофрактограми на етапі зародження руйнування в диску крильчатки від канавки шліцьового з'єднання навпроти місця розташування отвору для штифта (а, в) та по центру довжини шліцьової канавки (б, г)

зародження в цих місцях відбулося пізніше, коли через існування осередку руйнування в зоні між шліцьовим надрізом і отвором для штифта рівень навантаження на цих ділянках досяг критичного значення. Зародження тріщини від канавки шліцьового з'єднання було типовим для малоциклової втоми.

Спостерігали розетки крихких відколів, спричинені розтріскуванням інтерметалідів типу Al_3FeNi , які перемижувалися перетинками з матричної фази (твердий розчин Mg і Cu в Al), руйнування яких відбувалося з помітними слідами пластичної деформації (рис. 6). Причому, чим далі від зони впливу отвору для штифта на диску крильчатки до середини по довжині шліцьової канавки, тим пластика руйнування перетинок проявлялася яскравіше. Зростала і кількість, і товщина гребенів витягування під час руйнування матричної фази, що є ознакою зростання деформаційного чинника впливу на руйнування (адже в міру зростання довжини тріщини напружено-деформований стан в її вершині постійно зростає).

Характерні для малоциклової втоми неперервні гребені в'язкого витягування спостерігали лише на етапі зародження руйнування від дна шліцьової канавки навпроти отвору для штифта (рис. 7). За подальшого поширення

руйнування неперервність фронту пластичного деформування металу в околі вершини тріщини зникала. Таким чином, фрактографічно показали, що малоциклова втома (або так зване повторно-статичне навантаження) істотно вплинула на витримувальну здатність алюмінієвого сплаву в аналізованому елементі стартера. Подібні руйнування від дії повторно-статичних навантажень щораз частіше трапляються в силових елементах літаків, кораблів, деталях систем управління, двигунів з періодичними запусками, посудинах під тиском [7–12].

Порівняння фрактографічних особливостей руйнування диска на етапі його зародження і на завершальному етапі докритичного росту тріщини дають підстави стверджувати, що роль інтерметалідів у використаному сплаві полягає у формуванні поля концентраторів напружень мікроструктурного рівня (рис. 8). За дії циклічних навантажень спочатку відбувається їх декогезія від матриці, а пізніше – руйнування матричних перетинків між ними. Причому в міру просування тріщини в диску до доламу роль елементів силового пластичного руйнування на зламі зростала, що є ознакою щораз більшого впливу статичної складової циклу навантаження (рис. 8 в, г).

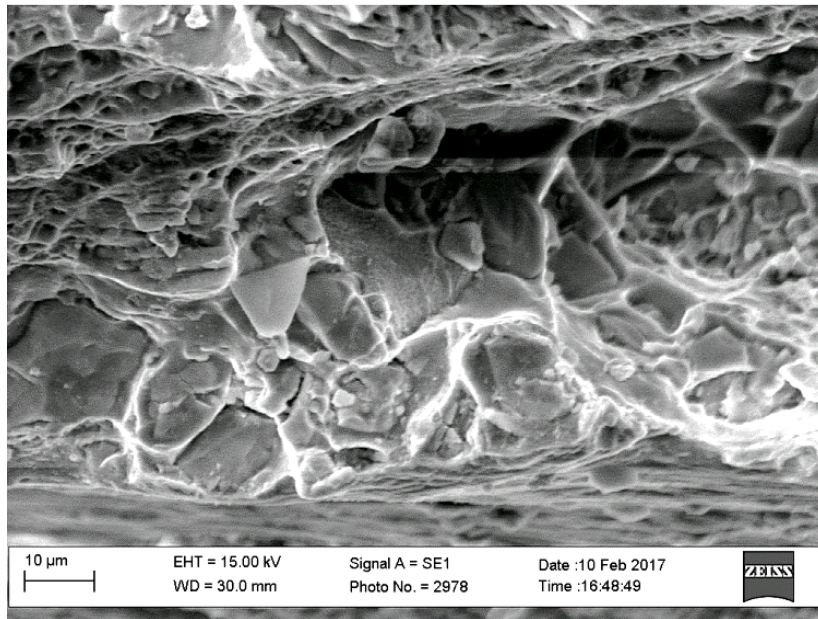
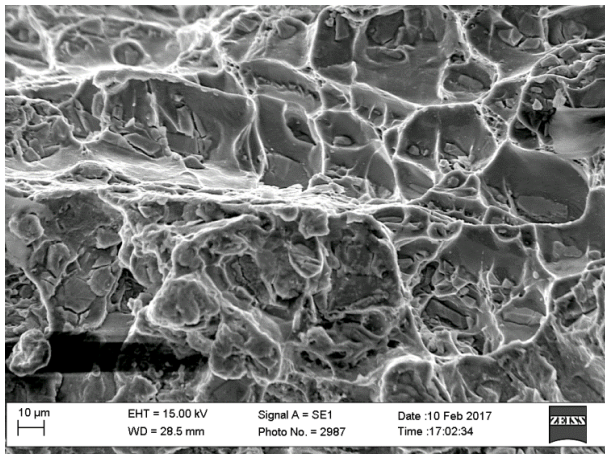
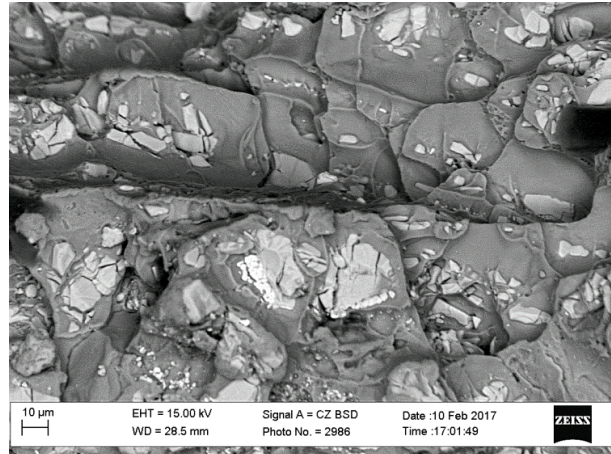


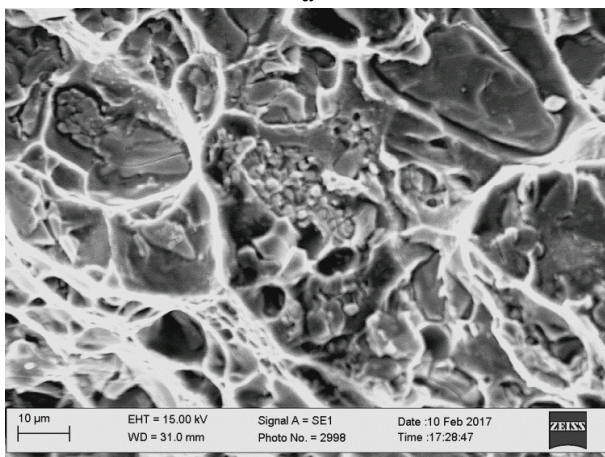
Рисунок 7 – Мікрофрактографічні особливості руйнування на етапі зародження тріщини від концентратора на дні шліцьової канавки крильчатки



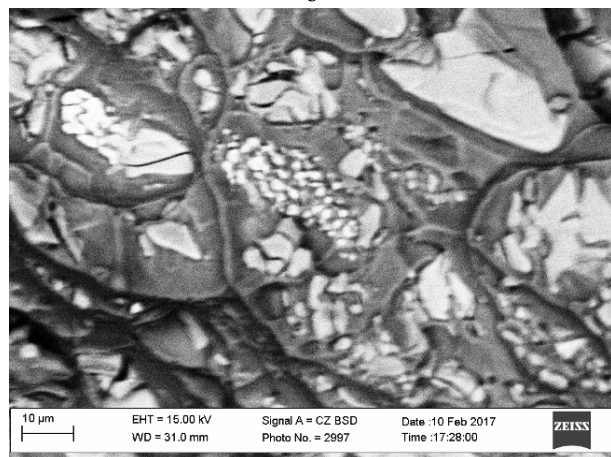
а



б



в



г

Рисунок 8 – Мікрофрактограми двох ділянок в околі отвору для штифта (а, б) та на етапі поширення руйнування в диску суцільним фронтом на завершальному етапі докритичного поширення тріщини (в, г), отримані в режимі фіксації Secondary electrons (а, в) і Backscattered electrons (б, г). На фрактограмах б і г інтерметаліди світліші, ніж матриця

Для запобігання виникненню пошкоджень повітряних стартерів для запуску конвертованих двигунів дотискувальних компресорних станцій важливо періодично контролювати величину зношування поверхонь контактування алюмінієвих дисків із сталевим валом, а також їх можливу пошкодженість. Зокрема, на основі відбору вібраційних сигналів від стартера з використанням багатоканальної інформаційно-вимірювальної системи *ВЕКТОР* [13, 14] можна моніторити стан обертових елементів конструкції і навіть визначити місце розташування в них дефектів.

З іншого боку, підвищити поріг втоми алюмінієвого сплаву крильчаток стартерів і, як наслідок, підвищити їх довговічність, можна поверхневим пластичним деформуванням (зокрема, з використанням мокрого струминопіскувального оброблення [15, 16] дрібними фракціями піску ~100 мкм) канавок шліцьового з'єднання під час планових обстежень для створення залишкових напружень стискання у поверхневих шарах металу в околі концентраторів напружень на дні канавок.

Висновки

Причиною руйнування корпусу повітряного стартера конвертованого двигуна газокompресорної станції загалом є руйнування диску крильчатки. Макро- та мікрофрактографічний аналізи поверхонь зламів виявили, що руйнування розпочалося від концентраторів напружень на дні канавок шліцьового з'єднання, в перерізі диску, ослабленому отвором для штифтів, що синхронізують обертання обох крильчаток стартера. Показали типовий для малоциклової втоми з високою асиметрією циклу навантаження змішаний характер докритичного поширення тріщини з формуванням розеток крихких відколів, спричинених руйнуванням інтерметалідів типу Al_3FeNi , та пластичним руйнуванням матричної фази в перетинках між ними.

Для запобігання виникненню пошкоджень повітряних стартерів рекомендовано під час профілактичних обстежень контролювати величину зношування в зоні шліцьового з'єднання валу з крильчатками. А для підвищення порогу втоми алюмінієвого сплаву рекомендовано створювати на поверхні канавок шліцьового з'єднання залишкові напруження стискання.

Література

1 Михалків В. Б. Вплив недовантаження газопроводу на вибір критерію оптимізації режимів роботи / В. Б. Михалків // Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". – 2017. – №10 (32). – С. 42–44.

2 Алюминиевые деформируемые сплавы – [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://libmetal.ru/al/al%20defspl.html>.

3 Луговской Ю. Ф. Прогнозирование влияния структуры на малоцикловую усталость сплавов на основе алюминия / Ю. Ф. Луговской // *Металлофизика и новейшие технологии*. – 2002. – С. 423–430.

4 Островская А. Е. Влияние интерметаллидных фаз на сопротивление разрушению алюминиевых сплавов [Текст] / А. Е. Островская, И. П. Волчок // *Вісник ДНУЗТ ім. В. Лазаряна*. – 2010. – Вип. 34. – С. 211–214.

5 Влияние интерметаллидных фаз на предел усталости вторичных силуминов / С. Б. Беликов, В. П. Силованюк, И. П. Волчок, А. А. Митяев // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. – 2015. – №1. – С. 32–37.

6 Повышение технологических, механических и служебных свойств вторичных силуминов / И. П. Волчок, В. В. Ключихин, К. Н. Лоза [и др.] // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. – 2015. – №1. – С. 69–74.

7 Применение алюминия и его сплавов – [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://plasma-welding.ru/technology/primalspl.html>.

8 Бычков А. С. Основные виды и причины разрушения конструктивных элементов из алюминиевых сплавов отечественных воздушных судов транспортной категории / А. С. Бычков, С. Р. Игнатович, А. Г. Моляр // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии* – 2015. – № 70. – С. 136 – 151.

9 Игнатович С. Р. Мониторинг выработки усталостного ресурса летательных аппаратов: монография / С. Р. Игнатович, М. В. Карускевич. – К.: НАУ, 2014. – 244 с.

10 Белецкий В. М. Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология, применение). Справочник / В. М. Белецкий, Г. А. Кривов; под общ. ред. И. Н. Фридляндера. – К.: Коминтех., – 2005. – 365 с.

11 Кириленко А. Н. Судостроительные сплавы на основе алюминия [Текст] А. Н. Кириленко // *Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра*. – 2010. – 197–203.

12 Мутьлина И. Н. Судостроительные материалы: учеб. Пособие / И. Н. Мутьлина. – Владивосток: Изд. ДВГТУ., – 2005. – 166 с.

13 Інформаційно-вимірювальна система для багатовимірної вібраційної діагностики / Яворський І.М., Юзефович Р.М., Кравець І. Б. [та ін.] // *Проблеми машиностроєння*. – 2013. – №3., Т. 16. –С. 45–50.

14 Вібродіагностична система ВЕКТОР для оцінювання технічного стану енергообладнання методами нестационарного аналізу / Яворський І. М., Юзефович Р. М., Мацько І. Й. [та ін.] // Енергетика та електрифікація. – 2014. – № 11. – С. 50–58.

15 Технологія очисно-зміцнювальної підготовки поверхні перед нанесенням захисних покриттів / Похмурський В.І., Калахан О.С., Чекурін В.Ф. [та ін.] // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин: зб. наук. статей. – К.: ІЕЗ НАН України, 2006. – С. 106–110.

16 Вплив методів та режимів поверхневої абразивної обробки на корозійно-електрохімічну поведінку та довговічність сталі Ст.3 / Калахан О., Чекурін В., Охота Г. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2006. спецвип. № 5. – С. 164–171.

Стаття надійшла до редакційної колегії

23.10.17

Рекомендована до друку

*професором **Петриною Д.Ю.***

(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)

*професором **Никифорчиним Г.М.***

*(Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка
НАН України, м. Львів)*