

# АВТОГЕНЕРАТОРНІ ВИХРОСТРУМОВІ ДЕФЕКТОСКОПИ ДЛЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ АВІАЦІЙНИХ КОНСТРУКЦІЙ

В.М. Учанін<sup>1</sup>, С.А. Бичков<sup>2</sup>, О.І. Семенець<sup>2</sup>, В.Я. Дереча<sup>2</sup>, С.А. Александров<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5. E-mail: vuchanin@gmail.com

<sup>2</sup>ДП «Антонов». 03062, м. Київ, вул. Академіка Туполева, 1. E-mail: derecha@antov.com

<sup>3</sup>ДП «Івченко-Прогрес». 69068, м. Запоріжжя, вул. Іванова, 2

Однією з причин порушень льотної придатності та аварійних руйнувань літаків в експлуатації є зародження та розвиток дефектів втомного і корозійного походження. Періодичний неруйнівний контроль відповідальних вузлів на всіх етапах життєвого циклу літаків є надзвичайно важливим фактором забезпечення їх безпечної експлуатації. Вихрострумівий метод має низку переваг порівняно з іншими методами контролю авіаційних конструкцій через високу чутливість до дефектів різного походження, продуктивність та можливість виявлення дефектів без безпосереднього контакту з поверхнею об'єкта контролю (ОК) або навіть через різні покриття без їх видалення. Метод використовують для виявлення експлуатаційних дефектів елементів авіаційних конструкцій, зокрема таких, як фюзеляж, крила, колісні диски, лопатки та турбіни авіаційних двигунів, кронштейни тощо. Вихрострумівий дефектоскопію з використанням високих робочих частот застосовують для безконтактного виявлення неглибоких поверхневих тріщин, зокрема таких, що виникають внаслідок втоми. Метод не має альтернативи за необхідності виявити тріщини у важкодоступних місцях, зокрема на бічних стінках заклепкових отворів. У статті представлено вітчизняні автогенераторні вихроструміві дефектоскопи сімейства ЛЕОТЕСТ з двоконтурною коливальною системою, які працюють у режимі переривчастої генерації. Дефектоскопи пройшли державні випробування та включені в регламент з технічного обслуговування літаків ДП «Антонов» і авіаційних двигунів ДП «Івченко-Прогрес» і ПАТ «Мотор-Січ». Наведено загальні методичні рекомендації та приклади застосування дефектоскопів для контролю вузлів літаків і деталей авіаційних двигунів в умовах їх експлуатації. Подано пропозиції щодо подальшого вдосконалення автогенераторних дефектоскопів з метою зменшення впливу на достовірність контролю суб'єктивних факторів, пов'язаних з кваліфікацією оператора-дефектоскопіста. Бібліогр. 15, рис. 11.

*Ключові слова:* вихрострумівий дефектоскоп, автогенератор, авіаційна конструкція, двигун, чутливість, достовірність контролю, алюмінієвий сплав, титановий сплав

**Вступ.** Експлуатаційні дефекти втомного і корозійного походження є однією з причин порушень льотної придатності та аварійних руйнувань літаків [1–3]. Прикрим прикладом може бути розгерметизація та аварійна посадка літака Боїнг 737-300 авіакомпанії Southwest Airlines через руйнування фюзеляжу. Аналіз показав, що обшивка зруйнувалась у місці з'єднання заклепками двох зовнішніх панелей, де перед тим утворилися втомні тріщини. Авіакомпанія стверджувала, що літак проходив усі необхідні перевірки та профілактичні роботи. Цей та багато інших прикладів підкреслюють актуальність постійного покращення чутливості та достовірності при виявленні експлуатаційних дефектів авіаційних конструкцій (АК) засобами неруйнівного контролю (НК) та важливість оптимізації процедур підтримання льотної придатності в цілому. Надійний періодичний НК на всіх етапах життєвого циклу літаків є важливим фактором їх безпечної експлуатації. Різні фізичні методи НК, що використовують для технічного обслуговування літаків, мають свої переваги та обмеження, пов'язані з чутливістю до дефектів різного типу, простотою та

продуктивністю процедур контролю, вартістю апаратури та витратних матеріалів тощо [4–7].

Вихрострумівий метод НК широко використовується для виявлення дефектів електропровідних матеріалів ще з 50-х років минулого століття [8–13]. Метод ґрунтується на взаємодії електромагнітного поля вихрострумівого перетворювача (ВСП) з матеріалом об'єкта контролю (ОК), яка призводить до утворення вихрових струмів. Порушення суцільності матеріалу (дефект) призводить до перерозподілу вихрових струмів і відповідної зміни сигналу ВСП. Метод має низку переваг порівняно з іншими методами НК авіаційних конструкцій через високу чутливість контролю до дефектів різного походження, продуктивність і можливість виявлення дефектів без безпосереднього контакту з поверхнею ОК або навіть через різні покриття без їх видалення. Вихрострумівий метод зазвичай використовують для виявлення втомних тріщин та корозійних пошкоджень елементів АК, зокрема таких, як фюзеляж, крила, колісні диски, лопатки та турбіни авіаційних двигунів (АД), кронштейни тощо [9, 11]. При цьому

Учанін В.М. – <http://orcid.org/0000-0001-9664-2101>, Семенець О.І. – <http://orcid.org/0000-0002-9117-2494>,

Дереча В.Я. – <http://orcid.org/0000-0003-1773-912X>

© В.М. Учанін, С.А. Бичков, О.І. Семенець, В.Я. Дереча, С.А. Александров, 2022

вихрострумова дефектоскопія з використанням високих робочих частот понад 1 МГц застосовується для безконтактного виявлення неглибоких поверхневих тріщин (наприклад тих, що виникають внаслідок втоми) у конструкціях літака (у тому числі через лакофарбове покриття). Цей метод не має альтернативи за необхідності виявити тріщини у важкодоступних місцях, зокрема розташованих на бічних стінках заклепкових отворів [12, 13].

У 90-х роках минулого століття виникла необхідність розробки вітчизняного вихрострумового дефектоскопа (ВД) з покращеними метрологічними та експлуатаційними характеристиками для заміни застарілих приладів російського виробництва. Головною вимогою при цьому було підвищення чутливості до коротких і дрібних втомних тріщин у неферомагнітних матеріалах з різною питомою електропровідністю (ПЕП) і у феромагнітних сталях, а також досягнення високої локальності контролю, необхідної для контролю деталей з криволінійною поверхнею, зокрема в зоні галтельних переходів та заклепок або на внутрішній поверхні отворів. Сучасні вимоги до ВД для контролю АК передбачають вирішення комплексу наступних задач:

- реалізувати можливість ефективного відстроювання від змін зазору між ВСП та поверхнею ОК, так як контроль в експлуатації часто проводиться через шар захисного покриття;
- забезпечити можливість роботи в польових і аеродромних умовах;
- забезпечити невелику вагу і розміри, захищеність від пилу та вологи, автономне живлення, просту індикацію наявності дефектів;
- ВД повинен працювати з ВСП різного типу (олівцеві, Г-подібні, для контролю отворів, пазів, різьб тощо).

Додатковою вимогою було подолання недоліків відомих автогенераторних ВД, серед яких – недостатня чутливість і нестабільна робота під час дефектоскопії деталей із титанових сплавів.

Поставлені завдання завершилися створенням автогенераторних ВД типу ВД 3.03Н, ВД 3.01Н, ВД 3.02Н, ВД 4.01Н, ВД 4.02Н, ВД 4.03Н (ЛЕОТЕСТ ВД), основним завданням яких є виявлення поверхневих дефектів у різних конструкційних електропровідних сплавах. Дефектоскопи пройшли державні випробування і внесені в державний реєстр засобів вимірювальної техніки. У цих ВД використано параметричні ВСП, питання оптимізації конструкції яких наведено в [13, 14]. Для побудови ВД використано автогенератор (АГ) з двоконтурною коливальною системою, що працює в режимі переривчастої генерації. Під час розробки ВД запатентовано низку нових технічних рішень, серед яких: схема АГ на польовому транзисторі з ізольованим затвором; схема керування

частотою генерації і схема регенерації коливальних автогенератора (СРКА). Дослідження особливостей цих схем наведено в [15], де також показано їх переваги порівняно з традиційними схемами.

У цій статті розглянуто особливості побудови та основні технічні характеристики розроблених автогенераторних ВД, а також результати їх використання для вихрострумової дефектоскопії авіаційної техніки.

**1. Високочастотні автогенераторні вихрострумові дефектоскопи типу ЛЕОТЕСТ ВД.** Функціональну схему ВД типу ЛЕОТЕСТ ВД з елементами комутації, керування та індикації представлено на рис. 1, на якій контуром виділено функціональні блоки, що розміщено на платі. За межами контурної лінії показано елементи комутації, керування та індикації, що розташовано переважно на передній і задній панелях ВД. Для настроювання ВД шляхом зміни резонансної частоти АГ передбачено два змінних резистори «НАСТРОЮВАННЯ»:  $VR1$  «ТОЧНО» і  $VR2$  «ГРУБО» [15]. Грубе настроювання виконують зміною постійної напруги на варикапі, який входить у коливальну систему АГ. Точне настроювання досягається незначною зміною добротності робочого контуру шляхом регулювання опору шунтувального змінного резистора  $VR1$ . Вибір робочої частоти для контролю матеріалів з високопровідних (ВП), низькопровідних (НП) і феромагнітних матеріалів (ФМ) проводять за допомогою перемикача режиму  $S2$  «ВП»–«НП»–«ФМ» шляхом підключення до робочого контуру конденсатора  $C$ . Друга група контактів перемикача  $S2$  комутує конденсатори зворотного зв'язку АГ (на рис. 1 не показано). Робочий контур складається з обмотки  $L$  ВСП і розподіленої ємності кабелю, який підключається за допомогою з'єднувача  $X1$  «ДАТЧИК» [14]. Для перевірки чутливості ВД за допомогою перемикача  $S1$  «ІМІТАТОР» до робочого контуру підключається додатковий резистор імітації порогового дефекту. Автогенератор зв'язаний з СРКА двома лініями, стрілки на яких показують напрямки впливу. По одній лінії на СРКА коливальний надходить сигнал з АГ. По іншій лінії на АГ надходить напруга живлення, що використовується для поновлення його коливальних після їх зриву шляхом збільшення напруги живлення [15]. Крім того, СРКА формує із сигналів, що надходять із АГ, сигнали керування світловою і звуковою індикаціями [15]. Світлова індикація дефекту здійснюється за допомогою червоного світлодіода  $VD1$  «ДЕФЕКТ», на який надходить сигнал з розширювача імпульсу, який збільшує тривалість імпульсу від дефекту до 60 мс (у 25 разів), що робить його помітним для оператора. Одночасно про дефект сигналізує стрілочний індикатор  $PV$ ,

стрілка якого переходить із зеленої зони шкали в червону. Сигнал керування звуковим індикатором з СРКА надходить на підсилювач струму звукового індикатора, з виходу якого звуковий сигнал через регулятор гучності  $VR3$  надходить через змінний резистор  $X2$  «ЗВУК» на головні телефони. Дефектоскопи включають за допомогою тумблера  $S3$  «ВКЛ». Живлення ВД здійснюється від вбудованого акумулятора  $GB$  напругою 9 В через стабілізатор, який створює стабілізоване живлення напругою 6 В. Для контролю заряду акумулятора  $GB$  використано компаратор. Після включення ВД за напруги живлення більше 7 В світлодіод  $VD2$  «ВКЛ» світиться зеленим світлом. При зменшенні напруги нижче 7 В компаратор спрацьовує і світлодіод  $VD2$  «ВКЛ» світиться червоним світлом, що сигналізує про необхідність заряду акумулятора. Для заряду акумулятора  $GB$  від зовнішньої мережі 220 В використовується зовнішній зарядний пристрій з вихідною постійною напругою 12 В, який підключається через з'єднувач  $X2$

«ЗП». Для стабілізації зарядного струму в схемі передбачено стабілізатор. Час безперервної роботи ВД від вбудованого акумулятора ємністю 220 мА·год за струму споживання 5 мА без підзарядки складає 44 год.

Розроблено низку автогенераторних ВД (рис. 2). Дефектоскоп типу ВД 3.03 (рис. 2, а) є універсальним, так як призначений для контролю виробів із алюмінієвих, титанових сплавів і феромагнітних сталей. Дефектоскопи типу ЛЕОТЕСТ ВД 3.01Н і ВД 3.02Н призначені для контролю тільки алюмінієвих сплавів та низькопровідних сплавів і феромагнітних сталей відповідно. У цих ВД відсутній перемикач режиму  $S2$  (див. рис. 1). Розроблено спрощені варіанти ВД типу ЛЕОТЕСТ ВД 4.01Н, ЛЕОТЕСТ ВД 4.02Н і ЛЕОТЕСТ ВД 4.03Н для контролю окремо тільки алюмінієвих, титанових сплавів і феромагнітних сталей відповідно, у яких відсутні стрілочні індикатори  $PV$ , перемикачі  $S2$  контрольованого матеріалу та імітатори дефекту  $S1$  (рис. 2, б).

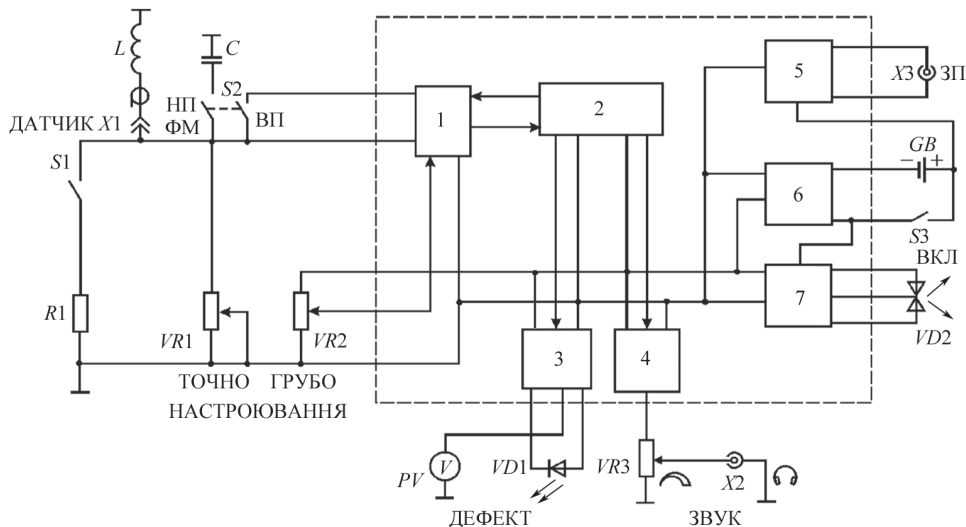


Рис. 1. Функціональна схема ВД типу ЛЕОТЕСТ ВД з елементами комутації, керування та індикації: 1 – АГ; 2 – СРКА; 3 – розширювач імпульсу; 4 – підсилювач звукового індикатора; 5 – стабілізатор зарядного струму; 6 – стабілізатор напруги 6 В; 7 – компаратор контролю розряду акумулятора;  $L$  – параметричний ВСП;  $S1$  – кнопка імітатора дефекту;  $S2$  – перемикач вибору матеріалів;  $S3$  – тумблер включення;  $R1$  – резистор імітації дефекту;  $VR1$  – змінний резистор настроювання «ТОЧНО»;  $VR2$  – змінний резистор настроювання «ГРУБО»;  $VR3$  – змінний резистор регулятора гучності;  $X1, X2, X3$  – з'єднувачі підключення ВСП, головних телефонів і зарядного пристрою відповідно;  $VD1$  – світлодіод індикації «ДЕФЕКТ»;  $VD2$  – світлодіод включення «ВКЛ» і розряду акумулятора;  $GB$  – акумулятор

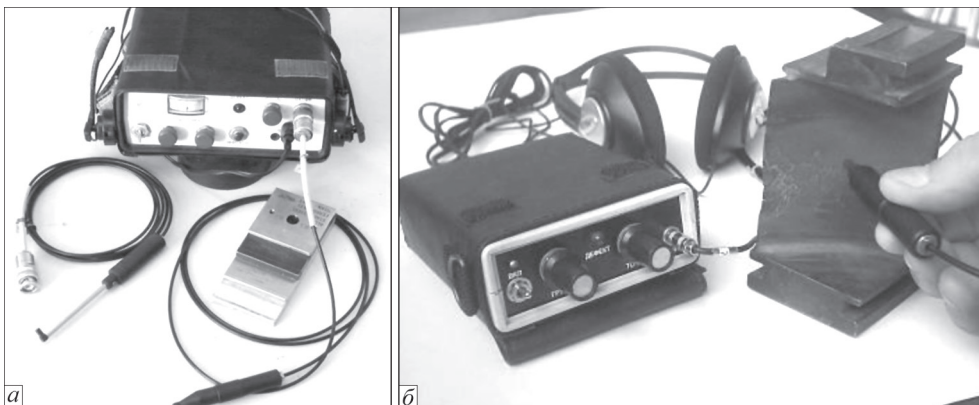


Рис. 2. Зовнішній вигляд ВД типу ЛЕОТЕСТ ВД 3.03Н з підключеним «олівцевим» ВСП і Г-подібним ВСП (а) і ВД типу ЛЕОТЕСТ ВД 4.01Н з ВСП «олівцевого» типу (б)

Основні технічні характеристики дефектоскопів типу ЛЕОТЕСТ ВД:

1. Поріг чутливості ВД забезпечує виявлення поверхневих дефектів, еквівалентних за можливістю виявлення штучному поверхневому дефекту типу прорізу з наступними розмірами:

1.1 Дефектоскопи типу ВД 3.01Н і ВД 4.01Н – у високопровідних неферомагнітних матеріалах (наприклад, алюміній та його сплави) – з розмірами: довжина 2 мм; ширина 0,1 мм; глибина 0,2 мм.

1.2 Дефектоскоп ВД 3.02Н і ВД 4.02Н – у низькопровідних неферомагнітних матеріалах (наприклад, сплави титану та аустенітні сталі) – з розмірами: довжина 2 мм; ширина 0,1 мм; глибина 0,5 мм.

1.3 Дефектоскоп ВД 3.03Н:

– у високопровідних неферомагнітних матеріалах (наприклад, алюміній та його сплави) – з розмірами: довжина – 2 мм; ширина – 0,1 мм; глибина – 0,2 мм;

– у низькопровідних неферомагнітних матеріалах (наприклад, сплави титану та аустенітні сталі) – з розмірами: довжина 2 мм; ширина 0,1 мм; глибина 0,5 мм;

– у феромагнітних сплавах (наприклад, конструкційні сталі типу Ст45): довжина 2 мм; ширина 0,1 мм; глибина 0,5 мм.

2. Сигналізація при виявленні дефекту здійснюється:

– звуковим способом головними телефонами;

– світловим індикатором (червоним світлодіодом);

– стрілковим індикатором.

3. Конструкція ВД повинна забезпечувати виконання наступних додаткових функцій:

– електронну імітацію наявності дефекту;

– контроль ступеня розряду акумулятора.

4. Електричне живлення ВД здійснюється від вмонтованого акумулятора з номінальною напругою 9 В.

5. Габаритні розміри електронного блоку не більше ніж 90×200×200 мм.

6. Маса ВД не більше ніж 2,5 кг.

7. Дефектоскопи забезпечують відстроювання від змін зазору між ВСП та поверхнею ОК під час сканування.

**2. Методичні рекомендації та досвід використання високочастотних ВД типу ЛЕОТЕСТ ВД для контролю вузлів літаків ДП «Антонов».**

Успішному впровадженню автогенераторних ВД передували заходи щодо забезпечення контролепридатності АК, реалізація яких передбачена на етапі конструювання кожного з літаків ДП «Антонов». При цьому ретельно враховують можливість та обмеження кожного з методів НК, у тому числі реалізованих за допомогою представлених ВД. Дефектоскопи типу ЛЕОТЕСТ ВД використовують для контролю літаків в експлуатації, зокрема під час робіт по продовженню ресурсу. Ними контролюють обшивки фюзеляжу і крила, силові панелі крила і центроплана, барабани коліс, кронштейни тощо (рис. 3). Підтверджено їх високу чутливість і можливість реалізації на їх основі типових методик контролю вузлів АТ. Це дозволило ввести ці ВД в регламент з технічного обслуговування літаків ДП «Антонов». На відміну від інших приладів ці ВД ефективні під час контролю вузлів із титанових сплавів, що дало можливість вперше контролювати зокрема деталі шасі (кронштейни, важелі, траверси тощо) літаків АН-72.

Методики вихрострумове контролю АК передбачають розділення поверхні ОК на окремі зони контролю. В окремі зони зокрема виділяють [8]: торці ребер жорсткості, лапок, полиць; радіусні (галтельні) переходи; дно проточок, колодязів, пазів; стінки колодязів, пазів; стінки наскрізних та глухих отворів; крайові ділянки; ділянки з однаковою кривизною; ділянки, що прилягають до феромагнітних елементів; ділянки з різною товщиною лакофарбового покриття.

Залежно від геометричних характеристик зон контролю та доступу до них вибирають відповід-



Рис. 3. Вихрострумове контролю обшивки фюзеляжу в зоні відкидної рампи літака АН-12 (а) та кронштейнів літака АН-124 (б) за допомогою дефектоскопа ЛЕОТЕСТ ВД 3.01Н

ний тип ВСП. Настроювати ВД необхідно, встановивши ВСП на ОК по нормалі до поверхні кожної зони перед її контролем; під час переходу до контролю деталей, виготовлених із матеріалу з іншою електропровідністю та зі зміною типу ВСП. Нахил осі ВСП відносно нормалі до поверхні не повинен перевищувати  $\pm 10^\circ$ . Після настроювання ВД перевіряють на бездефектній ділянці, переміщуючи ВСП у межах зони контролю по довільному трикутнику зі сторонами в кілька міліметрів. Якщо показники індикатора практично не відхиляються, вважається, що настроювання проведено на бездефектній ділянці. Перед контролем радіусного переходу проводять настроювання, встановивши ВСП на відстані 1,0...1,5 мм від осі переходу. Перед контролем стінки отвору таку перевірку виконують, обертаючи ВСП навколо осі на 20...30° в обидва боки. Якщо показники індикатора не змінились, то настроювання проведено на бездефектній ділянці. Надалі проводять контроль, переміщуючи ВСП (скануючи) по всій зоні контролю. Під час сканування вісь обмотки ВСП повинна бути перпендикулярною до поверхні ОК у кожній точці траєкторії сканування. Швидкість переміщення ВСП не повинна переви-

шувати 50 мм/с. Під час контролю плоских поверхонь проводять сканування, переміщуючи ВСП у двох взаємно перпендикулярних напрямках з кроком 2 мм (рис. 4, а). Для контролю радіусних переходів ВСП зигзагоподібно переміщують у напрямку, перпендикулярному осі переходу (рис. 4, б).

Під час контролю крайових зон (стики обшивок, зони отворів, пазів, заклепок тощо) ВСП переміщують вздовж краю на відстані 2 мм від нього до осі ВСП, як це подано на рис. 5.

Характерним прикладом реалізації технологій контролю за допомогою ВД типу ЛЕОТЕСТ ВД є контроль кронштейнів кріплення гідроциліндрів керування переднім трапом і гермотрапом преднього грузолока літаків АН-124 та АН-124-100, які виготовляють з алюмінієвого сплаву ВАЛ-10, В93пчТ1 або В16чТ (рис. 6). Тут контролюють зони навколо болтового з'єднання, перещуючи ВСП на відстані 3...4 мм від краю шайби, та торці проушин, переміщуючи ВСП вздовж кутових кромки на відстані 2 мм від краю (рис. 6, а). Аналогічно контролюють зони навколо болта основи кронштейна. Крім того, зону основи кронштейна контролюють шляхом переміщення ВСП вздовж краєвих кромки на відстані 2 мм від кромки або по центру (рис. 6, б).

Вище зазначалось, що відомі автогенераторні ВД мали недостатню чутливість до дефектів і стабільність під час дефектоскопії вузлів із титанових сплавів. Це можна пояснити їх низькою питомою електропровідністю, яка для основних титанових сплавів лежить у діапазоні приблизно від 0,5 до 1,5 МСм/м, що приблизно у 40 разів менше електропровідності алюмінієвих сплавів. Представлені ВД показали кращу чутливість, що дозволило розширити перелік вузлів, які контролюють вихрострумовим методом. Характерним прикладом є контроль качалки керування ступками передньої опори шасі літака АН-72 з титанового сплаву ВТ-22. Схему сканування критичних зон качалки під час контролю параметричним ВСП подано на рис. 7. Періодичному експлуатаційному контролю підлягають зокрема зони отворів (А, В і Г) і крайові зони (Б і Д) (рис. 7).

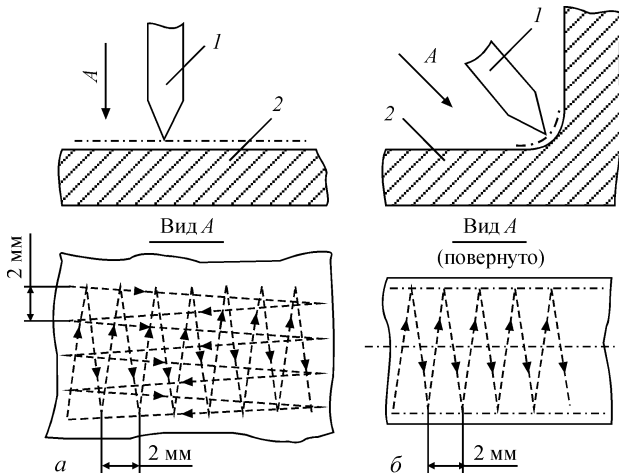


Рис. 4. Схеми сканування ділянок плоских поверхонь (а) і радіусних переходів (б): 1 – ВСП; 2 – ОК

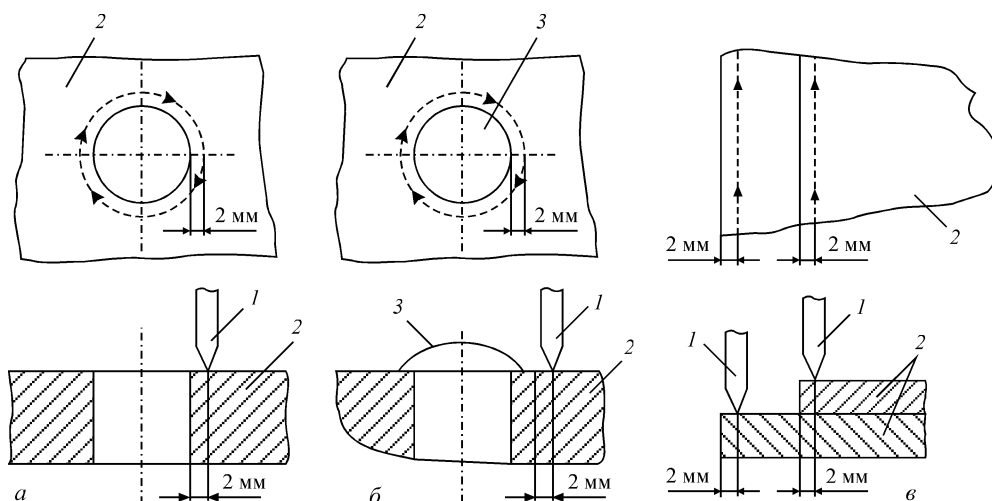


Рис. 5. Типові схеми сканування крайової зони отворів (а); зони заклепок (б) та стиків обшивок (в): 1 – ВСП; 2 – ОК; 3 – заклепка

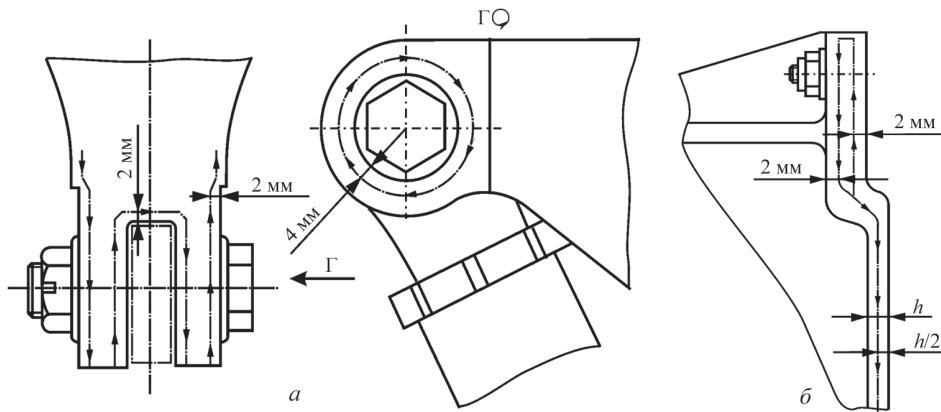


Рис. 6. Зони контролю кронштейнів кріплення літаків АН-124 та АН-124-100

З титанового сплаву ВТ-22 виготовлені також навіски закінцівки крила по першому і другому лонжеронах літаків АН-124 і АН-124-100, зони ви-

хрострумового контролю яких показано на рис. 8. Тут перед контролем необхідно демонтувати закінцівки крила, очистити поверхню від забруднень та видалити механічні пошкодження (риски, забоїни).

**3. Використання високочастотних ВД типу ЛЕОТЕСТ ВД 3.01Н для контролю авіаційних двигунів.** Дефектоскопи використовують для виявлення тріщин у деталях двигунів ПАТ «Мотор-Січ» і ДП «Івченко-Прогрес» (рис. 9). Під час тривалої експлуатації або після нештатних ситуацій (наприклад, попадання стороннього предмета) на хвостовику (рис. 10, а) і антивібраційних полицях (рис. 10, б) робочих лопатей вентилятора можлива поява і розвиток тріщин. Контроль здійснюють без демонтажу АД і додаткової підготовки поверхні. Даний контроль лопатей застосовують і під час капітальних ремонтів АД. Капілярний метод не завжди дозволяє виявити тріщини на таких лопатях. В одному з випадків капілярний метод (виконаний неодноразово) не підтвердив наявності дефекту, який впевнено виявляли за допомогою ВД типу ЛЕОТЕСТ ВД 3.03Н. Дослідження показали, що тріщина була «затиснутою» і практично не мала розкриття.

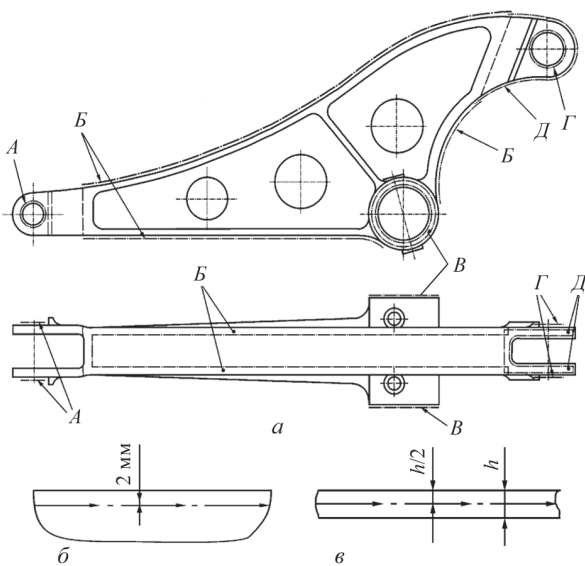


Рис. 7. Схема вихрострумового контролю качалки керування ступками передньої опори шасі літака АН-72 (а) та схеми сканування зони Б (б) і зони В і Д (в)

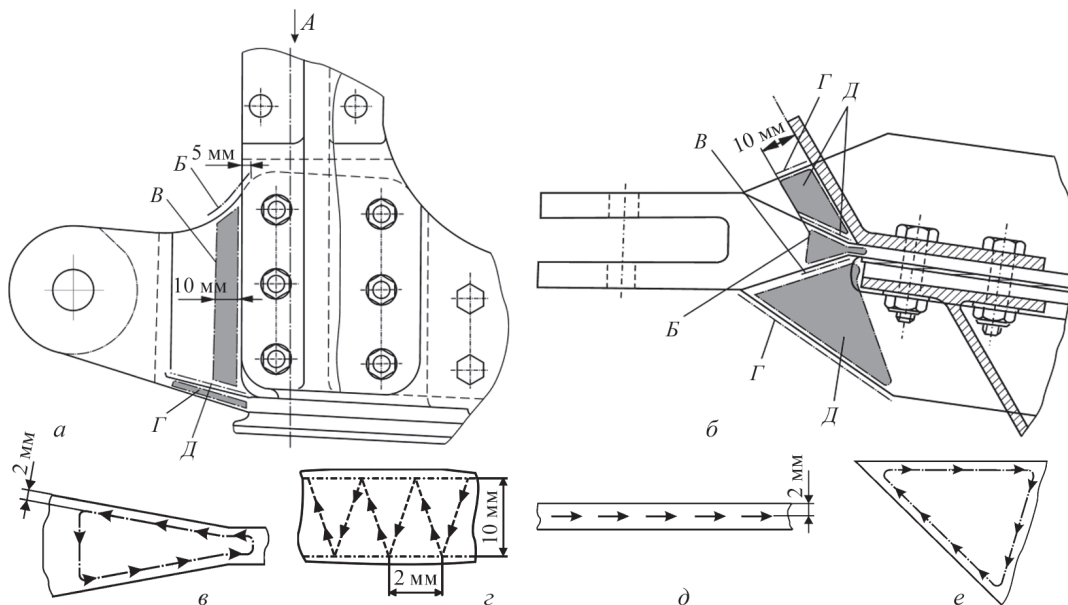


Рис. 8. Зони вихрострумового контролю (заштриховано) навіски закінцівки крила літаків АН-124 і АН-124-100: загальний вигляд (а) і вигляд по А (б), а також схеми сканування в зонах Б (в), В (г), Г (д) і Д (е)





Рис. 9. Контроль деталей АД дефектоскопом ЛЕОТЕСТ ВД 3.03Н

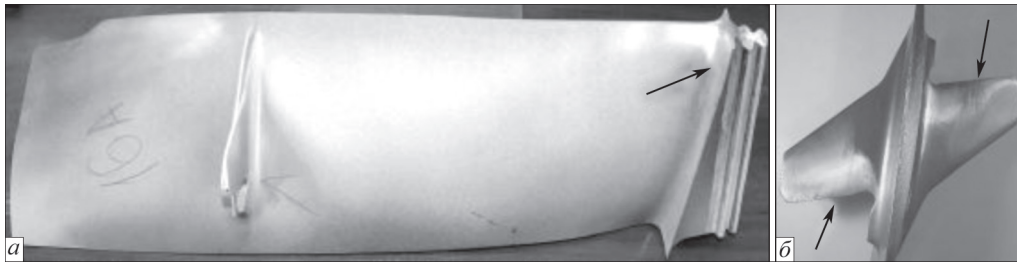


Рис. 10. Лопать вентилятора з зонами контролю хвостовика (а) і антивібраційних полиць (б)

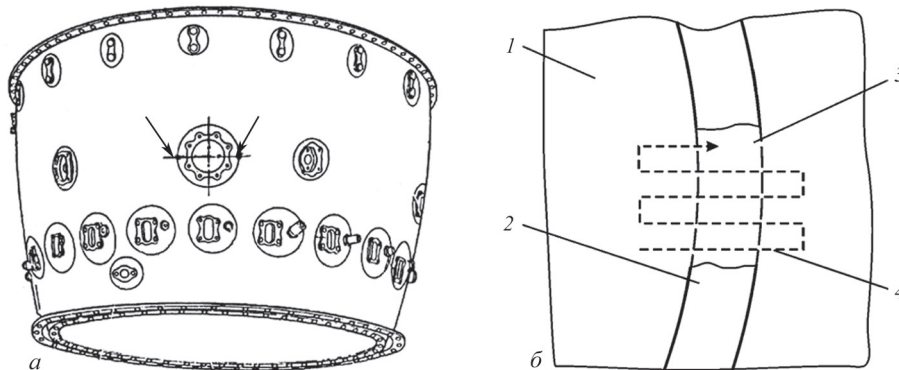


Рис. 11. Корпус камери згоряння (а) і схема контролю зварних швів (б): 1 – корпус камери; 2 – зварний шов; 3 – зона зачистки і контролю; 4 – схема сканування

Під час експлуатації та ремонту АД виникає необхідність виявляти втомні тріщини, що утворюються в зоні зварного з'єднання литої арматури (на рис. 11, а показано стрілками) з основним матеріалом корпусу камери згоряння. Зварювані деталі виконані зі сплавів типу ВЖ. Тріщини, як і в попередньому прикладі, практично не мали розкриття, так як після зупинки АД корпус камери охолоджується і стискається. Завдання ускладнюється також малою товщиною корпусу (близько 2 мм), великою шорсткістю поверхні, наявністю нагару і складною геометрією зони зварного з'єднання. Ці фактори повністю виключають можливість застосування капілярного і ультразвукового контролю. Дефектоскоп типу ЛЕОТЕСТ ВД 3.03Н дозволив вирішити задачу. При цьому для виключення інших чинників, що заважають проводити якісний контроль, виконується механічна зачистка валика підсилення зварного шва (рис. 11, б).

Для контролю внутрішніх порожнин АД за допомогою спеціальних маніпуляторів використа-

но мініатюрний ВСП. Крім того, останніми роками виникла необхідність виявлення в лопатях АД експлуатаційних тріщин завдовжки більше 1 мм. Для вирішення цієї задачі розроблено локальний ВСП параметричного типу з обмотками на феритових осердях діаметром 0,75 мм [14].

**Висновки і напрямки подальшого вдосконалення автогенераторних ВД.** Представлено автогенераторні ВД сімейства ЛЕОТЕСТ з двоконтурною коливальною системою, що працюють у режимі переривчастої генерації, у яких є нові технічні рішення, зокрема: схема двоконтурного АГ на польовому транзисторі з ізолюваним затвором, схема керування робочою частотою АГ і СРКА. Дефектоскопи пройшли державні випробування і включені в регламент з технічного обслуговування літаків ДП «Антонов» та авіаційних двигунів ДП «Івченко-Прогрес» і ПАТ «Мотор-Січ». Подано загальні методичні рекомендації із застосування ВД для дефектоскопії АК, а також характерні методики контролю вуз-

лів літаків ДП «Антонов» та деталей АД в умовах їх експлуатації.

Досвід використання ВД типу ЛЕОТЕСТ для контролю АГ підтвердив ефективність технічних рішень, закладених в їх основу. У той же час з метою зменшення впливу суб'єктивних факторів, пов'язаних з кваліфікацією оператора, актуальним є інтелектуалізація ВД шляхом автоматичного налаштуванням ВД на заданий оператором (або методикою контролю) рівень чутливості. Це буде реалізовано за допомогою процесорного керування режимом роботи АГ дефектоскопа. Відсутність таких можливостей у представлених вище ВД зменшує достовірність і повторюваність результатів ВК, особливо за його проведення операторами різної кваліфікації. У результаті запропоновано і реалізовано в макеті концепцію побудови автогенераторного ВД з автоматичним налаштуванням на заданий рівень чутливості і додатковою індикацією чутливості. Проведені випробування макета вдосконаленого ВД підтвердили його ефективність.

### Список літератури/References

1. [https://www.bbc.com/russian/international/2011/04/110404\\_us\\_plane\\_fatigue](https://www.bbc.com/russian/international/2011/04/110404_us_plane_fatigue)
2. Campbell, G.S., Lahey, R. (1984) A survey of serious aircraft accidents involving fatigue fracture. *Intern. Journal of Fatigue*, **6**(1), 25–30.
3. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Авиакатастрофы\\_в\\_СССР](https://ru.wikipedia.org/wiki/Авиакатастрофы_в_СССР). [https://ru.wikipedia.org/wiki/Авиакатастрофы\\_в\\_СССР](https://ru.wikipedia.org/wiki/Авиакатастрофы_в_СССР).
4. Hagemaijer, D.J. (1991) Nondestructive testing developments in the aircraft industry. *Materials Evaluation*, **49**(12), 1470–1478.
5. Hagemaijer, D.J. (1991) Application of crack detection to aircraft structures. In «*Fatigue crack measurement: techniques and applications*» (Eds K.J. Marsh, R.A. Smith and R.O. Ritchie). Warley (UK), EMAS, 419–455.
6. Ball, D.L. (2003) The Role of Nondestructive Testing in Aircraft Damage Tolerance. *Materials Evaluation*, **61**(7), 814–818.
7. Riegert, G., Pfeiderer, K., Gerhard, H., Solodov, I., Busse, G. (2006) Modern Methods of NDT for Inspection of Aerospace Structures. *9<sup>th</sup> Europ. Conf. on Non-destructive Testing, Berlin*. <https://www.ndt.net>
8. Федосенко Ю.К., Герасимов В.Г., Покровский А.Д., Останин Ю.Я. (2003) *Неразрушающий контроль. Справочник. Ключев В.В. (ред.). Т. 2 (Книга 2). Вихретоковый контроль*. 340–687. Fedosenko, Yu.K., Gerasimov, V.G., Pokrovsky, A.D., Ostanin, Yu.Ya. (2003) *Non-destructive testing: Refer. book. Ed. by V.V. Klyuev. Vol.2, Book 2. Eddy-current control*, 340–687 [in Russian].
9. Дорофеев А.Л., Казаманов Ю.Г. (1980) *Электромагнитная дефектоскопия*. Москва, Машиностроение. Dorofeev, A.L., Kazamanov, Yu.G. (1980) *Electromagnetic flaw detection*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
10. García-Martín, J., Gómez-Gil, J., Vázquez-Sánchez, E. (2011) Non-destructive techniques based on eddy current testing. *Sensors*, **11**, 2525–2565. DOI:<https://doi.org/10.3390/s110302525>
11. Глазков Ю.А., Беда П.И. (1997) Задачи эксплуатационной дефектоскопии, решаемые на этапе проектирования и изготовления объектов, *Дефектоскопия*, **4**, 3–11. Glazkov, Yu.A., Beda, P.I. (1997) Objectives of operational flaw detection, solved at the stage of design and fabrication of objects. *Defektoskopiya*, **4**, 3–11 [in Russian].
12. Беда П.И., Сапунов В.М. (2000) Опыт вихретокового контроля крепежных отверстий в конструкциях авиационной техники. *Там же*, **4**, 3–9. Beda, P.I., Sapunov, V.M. (2000) Experience of eddy current control of clamping holes in aviation engineering. *Ibid.*, **4**, 3–9 [in Russian].
13. Uchanin, V. (2021) Enhanced eddy current techniques for detection of surface-breaking cracks in aircraft structures. *Transactions on Aerospace research*, **1**(262), 1–14. DOI: <https://doi.org/10.2478/tar-2021-0001>
14. Uchanin, V.M. (2022) Optimization of the design of eddy current probe of parametric type to detect surface cracks. *The Paton Welding J.*, **3**, 54–64. DOI:<https://doi.org/10.37434/trwj2022.03.08>
15. Учанін В.М. (2022) Аналіз роботи двоконтурного автогенераторного вихреструмного дефектоскопа в режимі переривчастої генерації. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **2**, 24–34. DOI:<https://doi.org/10.37434/tdnk2022.02.04>

## SELF-GENERATOR EDDY CURRENT FLAW DETECTORS FOR OPERATIONAL CONTROL OF AIRCRAFT STRUCTURES

V.M. Uchanin<sup>1</sup>, S.A. Bychkov<sup>2</sup>, O.I. Semenets<sup>2</sup>, V.Ya. Derecha<sup>2</sup>, S.A. Aleksandrov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of NASU. 5 Naukova str., 79060, Lviv, Ukraine. E-mail: [vuchanin@gmail.com](mailto:vuchanin@gmail.com)

<sup>2</sup>SC «Antonov». 1 Acad. Tupolev str., 03062, Kyiv, Ukraine. E-mail: [derecha@antonov.com](mailto:derecha@antonov.com)

<sup>3</sup>SC «Ivchenko-Progress». 2 Ivanova str., 69068, Zaporizhzhia, Ukraine

Initiation and propagation of defects of fatigue and corrosion origin is one of the causes for violation of airworthiness and emergency damage of aircraft in service. Periodical nondestructive testing of critical components at all the stages of aircraft life cycle is an extremely important factor to ensure their safe service. The eddy current technique has a number of advantages, compared to other methods of aircraft structure testing, owing to high sensitivity to defects of different origin, productivity and ability to detect defects without direct contact with the surface of the tested object (TO) or even through different coatings without removing them. The method is used to detect service defects in aircraft structure elements, in particular such as fuselage, wings, wheel discs, blades and turbines of aircraft engines, brackets, etc. Eddy current flaw detection using high operational frequencies is applied for contactless detection of shallow surface cracks, in particular those, arising as a result of fatigue. The method has no alternative, when it is necessary to detect cracks in difficult-of-access places, in particular on side walls of rivet holes. The paper presents local self-generator eddy current flaw detectors of LEOTEST family with double-circuit oscillatory system, operating in the mode of intermittent generation. The flaw detectors have passed state trials and have been included into the maintenance regulations for aircraft of SC «Antonov» and aircraft engines of SP «Ivchenko-Progress» and PJSC «Motor-Sich». The paper gives general procedural recommendations and examples of application of flaw detectors for in-service testing of aircraft components and aircraft engine parts. Proposals were submitted as to further improvement of self-generator flaw detectors in order to lower the influence of subjective factors related to the qualifications of flaw detector operator on the reliability of control. Ref. 15, Fig. 11.

Keywords: eddy current flaw detector, self-generator, aircraft structure, engine, sensitivity, control reliability, aluminium alloy, titanium alloy

Надійшла до редакції 06.06.2022