

В.М. Грень, В.І. Полуянов, Н.В. Клобукова

Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ

НЕРУЙНІВНІ МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ЗВАРНИХ ШВІВ ДЕТАЛЕЙ АВІАЦІЙНИХ ГТД

Представлено основні види та методи неруйнівного контролю зварних з'єднань, які передбачають їх проведення зі збереженням початкових характеристик виробів, їх класифікація та характеристика. Виокремлено найбільш розповсюджений та ефективний спосіб знаходження дефектів.

Ключові слова: неруйнівний контроль, зварні з'єднання, метод контролю, авіаційний двигун.

Вступ

Постановка проблеми. У Повітряних Силах Збройних Сил України експлуатуються літаки, в яких строк служби перевищує понад 30 років, у зв'язку з чим виникає закономірна необхідність більш ретельно контролювати їхній стан.

Літак протягом одного польоту піддається дії вібрації, перепаду атмосферного тиску, перепаду температур, знакозмінних механічних навантажень. Поява тріщин, як на силових, так і не силових елементах конструкції літака неминуха (рис.1).



Рис. 1. Тріщина на передньому корпусі двигуна РД-33.

Джерело: [1, с. 47].

В останні роки почастишали випадки руйнування переднього корпусу авіаційного двигуна РД-33 в місцях зварювання стійок з корпусом компресора низького тиску.

Тріщини є неприпустимими дефектами, оскільки є концентратором напруги і осередком руйнування. Це найнебезпечніші дефекти зварного

з'єднання, які часто призводять до руйнування. Проявляються вони у вигляді розриву в зварному шві або в прилеглих до нього зонах.

Спочатку тріщини утворюються з дуже малим розкриттям, але під дією навантажень їх поширення можливе із швидкістю звуку, внаслідок чого відбувається руйнування конструкції.

Неруйнівний контроль є основним методом контролю зварних з'єднань, оскільки дозволяє зберегти цілісність контрольованого вузла і його експлуатаційні якості. Існує безліч методів і величезна кількість моделей устаткування, заснованого на тому або іншому з цих методів.

При виборі методу контролю необхідно враховувати численні чинники. А саме: як матеріал зварюваних деталей, конструкція зварного з'єднання, стан поверхні, вимоги до якості, доступ, вид і розташування можливого дефекту, вартість і продуктивність контролю.

Внаслідок цього, одного універсального способу контролю не існує, і від вибору найбільш оптимального варіанту значною мірою залежатиме якість, надійність і довговічність кінцевого виробу.

Мета статті – представити методи неруйнівного контролю, які передбачають проведення контролю із збереженням початкових характеристик виробів, які досліджуються.

Виклад основного матеріалу

Зварні з'єднання є найпоширенішим видом нероз'ємних з'єднань в усіх областях промислового виробництва.

Існує велика кількість їх типів як за способами виконання (ручна електродуга, автоматична і напівавтоматична, під флюсом, дугова в захисному газі, контактна й ін.), так і за видами з'єднань (стикове, кутове, таврове). Проте, незалежно від того, яким методом було виконано зварне з'єднання, після закінчення зварювальних робіт, в

більшості випадків виконується контроль зварного шва [1, с. 75].

Дефектоскопія спрямована на виявлення різних дефектів, які призводять до послаблення міцності і надійності з'єднання, а також порушення їх герметичності. Своєчасне виявлення таких дефектів істотно впливає на визначення експлуатаційного ресурсу зварної конструкції в цілому. Якість виконання зварних швів є особливо критичною при експлуатації систем, що працюють під високим тиском, елементів конструкцій.

Від якості зварного шва безпосередньо залежить надійність конструкції. В процесі зварювання в місці об'єднання деталей можуть утворюватися різні дефекти, які призводять до послаблення міцності з'єднання і наступного руйнування конструкції [2, с. 121].

Після зварювання зварні з'єднання, як правило, контролюють візуальним методом. Огляду піддають зварний шов і біляшовну зону. При виявленні поверхневих дефектів розміром менше 0,1 мм використовують оптичні пристрої, від 4 до 7-ми кратного збільшення. Необхідність застосування для візуального огляду оптичних приладів з вказівкою кратності їхнього збільшення обумовлена в технічній документації на контроль.

При контролі в недоступних для зовнішнього огляду зварних з'єднань використовують оптичні прилади. Наприклад, ендоскоп на основі гнучких світлопровідних трубок [3, с. 47].

Зварні вироби, що піддаються термообробці, також контролюються. Їх зовнішній огляд, як правило, поєднують з виміром конструктивних елементів зварних швів або точок з метою виявлення відхилення за розмірами і формою швів та точок від вимог стандартів, креслень, технічних умов і інструкцій зі зварювання виробів.

Основними конструктивними елементами зварних швів є: ширина шва, висота посилення і проплаву, плавність переходу від посилення до основного металу та ін. У зварних точках контролюють: форму і діаметр, глибину відбитка, відстань між точками та ін.

При огляді виявляють, як правило, поверхневі пори, тріщини всіх видів і напрямків, напливи, пропали, свищі, подрізи, незаварені кратери, непровари та інші дефекти. Якість вважається незадовільною, якщо будуть виявлені недопустимі дефекти (рис.2).

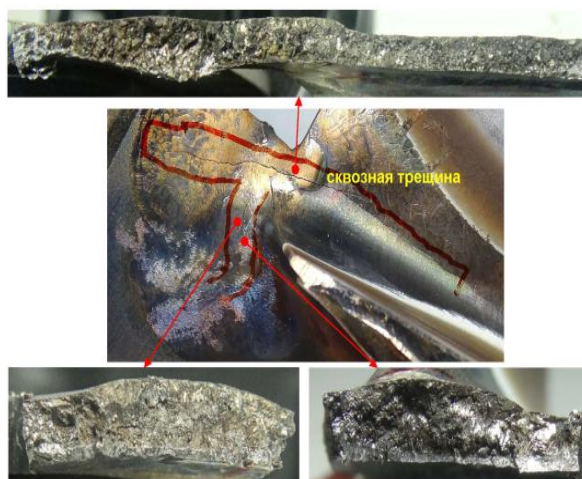


Рис. 2. Злами за розкритими тріщинами на передньому корпусі двигуна РД-33.
Джерело: [1, с. 68].

Норми допустимих дефектів приводяться на кресленнях виробів. При відсутності кількісних показників дефектів контроль здійснюють за еталонами або контрольними зразками. Це порівняння доцільне при аналізі нерівномірності та величини лусочок, зони кольорів мінливості, форми катета кутових швів тощо.

Види неруйнівного контролю, класифікація і коротка характеристика.

Всі дефекти викликають зміну однієї або декількох фізичних характеристик металів і їх сплавів – щільності, електропровідності, магнітної проникності, пружних властивостей тощо.

Фізичну основу методів неруйнівного контролю складає дослідження змін характеристик металів і виявлення дефектів, що є причиною цих змін.

Методи неруйнівного контролю класифікують на наступні види: візуально-вимірювальний, акустичний, магнітний, оптичний, капілярний, радіаційний, радіохвильовий, тепловий, електричний, електромагнітний вихрових струмів, ультразвуковий [7, с. 54; 8, с. 32].

Акустичний метод заснований на реєстрації пружних коливань, порушуваних у контрольованому об'єкті, застосовують для виявлення поверхневих і внутрішніх дефектів. Акустичні методи дозволяють вимірювати геометричні параметри при односторонньому доступі до виробу.

Однією з головних переваг цього методу є те, що для дослідження зварного шва потрібний ультразвуковий дефектоскоп. Не вимагається витрачати багато часу, при цьому достовірність результатів виявлення дефектів дуже висока.

Магнітний метод заснований на реєстрації магнітних полів розсіювання над дефектами або магнітних властивостей контрольованого об'єкта. Застосовують для виявлення поверхневих і підповерхневих дефектів у виробках, виготовлених з феромагнітних матеріалів (магнітопорошковий, магнітографічний, магнітоіндукційний, ферозондовий та інші методи).

Одним з недоліків цього методу є те, що для його використання потрібна спеціальна структура металу, яка має здатність намагнічуватися. Тому цей метод застосовують тільки для визначення якості зварного шва на феромагнітних сплавах.

Оптичний метод заснований на взаємодії світлового випромінювання з контрольованим об'єктом.

За характером взаємодії розрізняють методи наскрізного, відбитого, розсіяного та індукційного випромінювання (останнім терміном визначають оптичне випромінювання об'єкта під дією зовнішнього впливу, наприклад, люмінесценцію).

Оптичні методи широко застосовують у зв'язку з великою розмаїтістю способів одержання первинної інформації (амплітуда, фаза, ступінь поляризації, частота або частотний спектр, час проходження світла через об'єкт, геометрія переломлення та відбиття випромінювання).

Капілярний метод заснований на капілярному проникненні індикаторних рідин у порожнину поверхневих дефектів. При цьому методи контролю на очищену поверхню деталі наносять проникаючу рідину, що заповнює порожнини поверхневих дефектів. Потім рідину видаляють, а частину, що залишилася у порожнинах дефектів, виявляють нанесенням проявника, який утворює індикаторний рисунок (колірний, люмінесцентний, люмінесцентно-світловий, фільтруючих часток, радіоактивних рідин тощо) (рис.3).

Перевага цього методу полягає в тому, що дає можливість його використання не лише в лабораторних, але і в польових умовах, а також доступність і швидкість виявлення дефектів.

Проте цей метод здатний виявити тільки поверхневі дефекти.

Радіаційний метод заснований на реєстрації та аналізі проникаючого іонізуючого випромінювання.

Проникаюче випромінювання (рентгенівське, гама, потоки нейтронів), проходячи крізь товщу виробу, по різному послаблюється в дефектній і бездефектній області і несе інформацію про

внутрішню будову речовини та наявність дефектів всередині контрольованих об'єктів [4, с. 68; 5, с. 81].

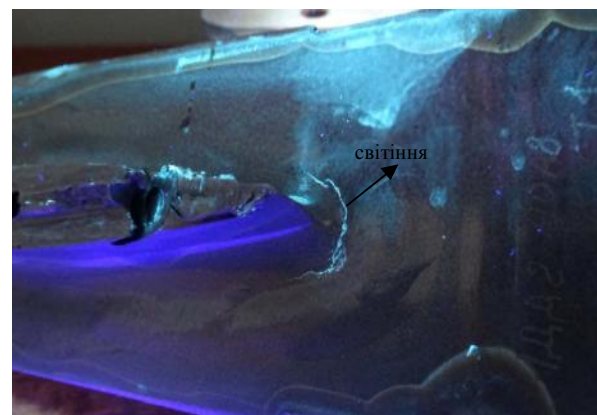


Рис. 3. Індикаторний рисунок дефекту на проточній поверхні фрагменту зварного з'єднання стійки переднього корпусу двигуна РД-33.

Джерело: [1, с. 93].

Однією із головних переваг радіаційного методу в цілому є висока чутливість і отримання виразних знімків для точного визначення видів дефектів.

Радіохвильовий метод заснований на реєстрації зміни параметрів електромагнітних хвиль радіодіапазону, взаємодіючих з контрольованим об'єктом.

Як правило, застосовують хвилі надвисокочастотного діапазону довжиною 1...100 мм для контролю діелектриків, магніодіелектриків, напівпровідників і тонкостінних металевих об'єктів (де радіохвилі не дуже сильно згасають).

Тепловий метод заснований на реєстрації змін теплових або температурних полів контрольованого об'єкта. За характером взаємодії з об'єктом контролю розрізняють пасивний (на об'єкт не впливає зовнішнє джерело) і активний методи (об'єкт нагрівають або охолоджують від зовнішнього джерела).

Вимірюваним інформаційним параметром є температура або тепловий потік.

Найголовнішою перевагою цього методу є те, що за допомогою використання пірометрів можна вимірювати фізичні та геометричні параметри об'єктів безконтактно на великих відстанях.

Вихореструмовий неруйнівний контроль заснований на аналізі взаємодії зовнішнього електромагнітного поля з електромагнітним полем вихоревих струмів, що наводяться в об'єкті контролю цим полем.

Принцип дії вихоревих дефектоскопів заснований на методі вихоревих струмів, який

полягає в порушенні вихоревих струмів в локальній зоні контролю і реєстрації змін електромагнітного поля вихоревих струмів, обумовлених дефектом і електрофізичними властивостями об'єкту контролю.

Характеризується невеликою глибиною контролю. Використовується для виявлення тріщин матеріалу на глибині до 2 мм.

Конструкція і методи налаштування приладів вихореструмового контролю нагадують конструкцію і методи налаштування їх ультразвукових аналогів, в них використовуються відповідно вихореструмові перетворювачі і вихореструмові стандартні зразки.

Ультразвуковий метод контролю. Цей вид контролю є одним з найпоширеніших, оскільки дозволяє з великою точністю виявляти приховані дефекти, розташовані усередині зварного шва.

Метод заснований на використанні ультразвукових хвиль, які проходять через шар металу і відбиваються від його межі і меж внутрішньої поверхні. За різницею в часі між посланим і відбитими сигналами, а також за формою і амплітудою відбитих сигналів можна судити не лише про товщину металу, але і про дефекти, що зустрічаються на шляху ультразвукового сигналу.

Очевидно, що ультразвуковий та вихореструмовий методи контролю взаємно доповнюють один одного, забезпечуючи повноту та достовірність контролю зварного шва по усій його глибині і протяжності [6, с. 57; 7, с. 124].

Прилад для проведення ультразвукового неруйнівного контролю називається дефектоскопом. У дефектоскопі використовуються спеціальні перетворювачі (випромінювачі-приймачі ультразвукового сигналу), які дозволяють реалізовувати такі методи контролю, як ехо-імпульсний, ехо-дзеркальний та дзеркально-тіньовий.

Досвід експлуатації зварних конструкцій показує, що технологічні дефекти можуть істотно знижувати працездатність зварних з'єднань. У конструкціях, що працюють в умовах статичного навантаження, дефекти нерідко стають осередками крихких тріщин, які виникають при низьких рівнях робочих температур, а в конструкціях, що працюють при змінних навантаженнях, вони знижують межу витривалості зварних з'єднань.

Механізм впливу дефектів на міцність в обох випадках різний, у зв'язку з чим вплив дефектів

на міцність в умовах статичного і динамічного навантаження розглянуто окремо.

Вплив дефектів на статичну міцність зварних з'єднань.

Гострі тріщиноподібні дефекти (тріщини, непровари, несплавлення, підрізи) нерідко стають осередками крихких руйнувань [8, с. 43; 9, с. 65; 10, с. 111].

Разом з тим, далеко не кожний дефект становить небезпеку відносно цього. Для визначення надійності зварних конструкцій і встановлення вимог, що пред'являються до якості зварних з'єднань, необхідно мати відомості про вплив найбільш ймовірних дефектів на міцність з'єднань в умовах, близьких до реальних.

Прийнято вважати, що дефекти послаблюють робочий перетин з'єднань, викликають у них концентрацію напружень і об'ємність напруженого стану. При цьому приймають, що механічні властивості матеріалу у зоні дефекту змінюються незначно. При такій ситуації реальну загрозу для конструкцій, що працюють в умовах природно низьких температур (до -60°C), можуть представляти дефекти відносно великих розмірів. Інакше кажучи, коли матеріал зварного з'єднання має великий запас міцності, основний вплив на міцність здійснює відносна величина дефекту. При більш низьких температурах картина істотно змінюється: основним фактором, що визначає міцність, стає інтенсивність напружень у зоні дефекту.

Залежність величини номінальних руйнівних напружень від температури у цьому випадку можна представити у такий спосіб: при позитивних і природно низьких температурах (до -60°C) руйнування мають в'язкий і квазікрихкий характер, а руйнівні напруження перевищують величину межі текучості матеріалу.

Надалі, у міру зниження температури, міцність матеріалу продовжує зменшуватися, і врешті-решт настає момент, коли релаксація напружень у вершині дефекту стає неможливою. У цих умовах крихка тріщина виникає і поширюється при низькому рівні номінальних напружень. Температура, при якій починає спостерігатися це явище, називається нижньою критичною. Вона залежить від ряду факторів і насамперед від пластичних властивостей металу шва.

Здавалося, що при природно низьких температурах не слід побоюватися дефектів відносно малих розмірів, однак практика показує, що крихкі руйнування від таких дефектів все ж спостерігаються.

Подібні руйнування свідчать про існування інших факторів, що сприяють підвищенню чутливості металу швів до технологічних дефектів. Схематично цей вплив можна представити зміною положення нижньої критичної температури, що відповідає різкому зниженню міцності зварного з'єднання.

Ймовірно, це пов'язане з тим, що локальні механічні властивості матеріалу у зонах дефектів зазнають зміни. Найбільш часто ці зміни пов'язані з деформаційним старінням сталі, що значно знижує її опір виникненню крихкої тріщини. Іноді зменшення міцності матеріалу обумовлено водневою крихкістю [11, с. 94; 12, с. 38; 13, с. 73].

Погіршення пластичних властивостей сталі у вершині дефекту на практиці може бути пов'язане з природним старінням металу у зонах концентрації пластичних деформацій, які виникають при попередньому перевантаженні конструкцій.

Висновок

В статті розглянуто основні методи неруйнівного контролю зварних швів. Очевидно, що найбільш точні результати перевірки та безпечні умови проведення аналізу забезпечує комбіноване використання методів ультразвукового, вихореструмового і магнітопорошкового неруйнівного контролю.

Напрями подальших досліджень. Подальші наукові дослідження доцільно зосередити на аналізі використання різних методів неруйнівного контролю зварних швів деталей ГТД в послідовності, яка буде забезпечувати найбільш точні результати перевірки якості зварних швів.

Список літератури

1. Камель Г.І., Гасило Ю.А., Івченко П.С., Романюк Р.Я. Контроль якості зварювання, Том 1 Неруйнівні методи контролю. // Міністерство освіти і науки України. Дніпровський державний технічний університет. – 2018. – 240 с.
2. Марковец М. П. Исследование связи ударной вязкости стали с характеристиками растяжения / М.П. Марковец, В.М. Матюнин // Докл. АН СССР. Тех. физика. – 1970. – Т. 191. – № 1. – С. 79–81.
3. Марковец М. П. Построение диаграмм твердости при вдавливании шара / М.П. Марковец, В.М. Матюнин, В.И. Дегтярев // Металл в современных энергоустановках. – М.: Энергия, 1972. – С. 75–76.
4. Гурвич А.К. Ультразвуковая дефектоскопия сварных швов / А.К. Гурвич, И.Н. Ермолов. – К.: Техника, 1972. – 460 с.
5. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / под ред. акад. Б.Е. Патона. – М.: Машиностроение, 1974. – 768 с.
6. Pao Y. H. Acoustic emission and transient waves in an elastic plate / Y.H. Pao, R.R. Gajewski, A.N. Geranoglu // Acoustic Soc. of America, 1979. – Vol. 65. – № 1. – Р. 96–105.
7. Андрейкив А.Е. Метод АЭ в исследовании процессов разрушения / А.Е. Андрейкив, Н.В. Лысак. – К.: Наукова думка, 1989. – 176 с.
8. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, В.Н. Филинов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1995. – 488 с.
9. Современные зарубежные приборы и установки неразрушающего контроля // Экспресс-информация: Приборы, средства автоматизации и системы управления. – 1997. – Вып. 6. – 46 с.
10. Визуальный и измерительный контроль / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, В.Ф. Мужичкий [и др.]. - М.: РОНКТД, 1998. – 245 с.
11. Щербинский В.Г. Ультразвуковой контроль сварных соединений / В.Г. Щербинский, Н.П. Алешин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 496 с.
12. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / под ред. Б.Е. Патона. – К.: Индпром, 2001. – 815 с.
13. Сварка. Резка. Контроль: справочник в 2 т. / под общ. ред. Н.П. Алешина, Г.Г. Чернышова. – М.: Машиностроение, 2004. – 1108 с.

Надійшла до редколегії 23.09.2022

Схвалена до друку 5.12.2022

Відомості про авторів:

Грень Віталій Миколайович

старший науковий співробітник
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-8920-2351>

Полуянов Володимир Інокентійович

науковий співробітник
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-5123-120X>

Клобукова Ніна Володимирівна

науковий співробітник
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-4538-5616>

Information about the authors:

Vitalii Gren

Senior Researcher
of State Research Institute of Aviation,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-8920-2351>

Volodymyr Poluyanov

Researcher Associate
of State Research Institute of Aviation,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-5123-120X>

Nina Klobukova

Researcher Associate
of State Research Institute of Aviation,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-4538-5616>

**NON-DESTRUCTIVE METHODS OF CONTROL WELDED JOINTS OF
AIRCRAFT ENGINES**

V. Gren, V. Poluyanov, N. Klobukova

The article presents the results of research and analysis non-destructive methods of control welded joints of aircraft engines.

In the last years the cases of destruction of front corps of aviation engine of RD-33 became more frequent in the places of welding of bars with the corps of compressor.

An airplane during one flight is exposed to the action of vibration, overfall of atmospheric pressure, will come way temperatures, alternating mechanical loads. Appearance of cracks, as on the power, so not power elements of construction of airplane inevitable.

Cracks are impermissible defects, as is the concentrator of tension and site of breakdown. It is the most dangerous defects of the weld-fabricated connection, which often result in destruction. They show up as a break in the weld-fabricated guy-sutures or in adjoining to him areas.

Non-destructive control is the basic method of control of the weld-fabricated connections, as allows to save integrity of the controlled knot and him operating internalss. There is an enormous amount of methods and enormous amount of models of equipment, based on that or other from these methods. At the choice of control method it is necessary to take into account numerous factors, such as material of weldable details, construction of the weld-fabricated connection, state of surface, requirement to quality, access, kind and location of possible defect, cost and control productivity.

Hereupon, one universal method of control does not exist, on the choice of the most optimal variant quality, reliability and longevity of eventual good, will depend largely.

Keywords: non-destructive methods of control, welded joints, method.