

УДК 539.3

П. Ясній<sup>1</sup>, докт. техн. наук;  
В. Гуцайлюк<sup>2</sup>, канд. техн. наук; С. Гладь<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя  
<sup>2</sup>Військово-технічна академія імені Ярослава Домбровського

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАРОДЖЕННЯ ТА ПОШИРЕННЯ КОРОТКИХ ВТОМНИХ ТРІЩИН В АЛЮМІНІЄВОМУ СПЛАВІ 2024-T3 МЕТОДОМ ВИХРОСТРУМОВОЇ ДЕФЕКТОСКОПІЇ

*Резюме.* Опрацьовано методику визначення первинного втомного мікропошкодження елементів заклепочного з'єднання за допомогою вихрострумового дефектоскопа. Встановлено, що початкове пошкодження у формі короткої тріщини виникає в середній частині листа накладки в місці переходу конусної ділянки отвору в циліндричну. Втомна тріщина поширюється в обидва боки до поверхні листа з виходом на поверхню. Досліджено вплив асиметрії циклу навантаження на втомну довговічність зразків.

*Ключові слова:* заклепочні з'єднання, короткі втомні тріщини, вихрострумовий дефектоскоп.

P. Yasniy, V. Hutsaylyuk, S. Hlado

## RESEARCH OF INITIATION AND PROPAGATION OF SHORT FATIGUE CRACKS IN ALUMINUM ALLOY 2024-T3 WITH EDDY CURRENT TEST SYSTEMS

*The summary.* The method of determination of primary fatigue microcracks in rivet joints are worked with an eddy current test system. It is set that the primary short crack initiates in middle part of strap sheet in the place of transition of cone area of rivet hole in cylinder. Propagation of fatigue crack takes place in both sides to the surface of sheet and reveal. Explored influence of cycle asymmetry of loading on longevity of samples.

*Key words:* rivet joints, short fatigue cracks, eddy current test system.

**Постановка проблеми.** В такій галузі як авіація надзвичайно важливою є безпека експлуатації конструкцій. Елементи конструкції планера літального апарата різною мірою схильні до експлуатаційних пошкоджень, але у 80% випадків втомні тріщини виникають у місцях з'єднань деталей заклепками і болтами, які є місцями підвищених циклічних навантажень і місцями їх зосередження. Експлуатаційні навантаження призводять до зародження та поширення втомних тріщин. Проблема полягає в тому, що тріщина виникає на ділянці під головкою заклепки, яка закрита для візуального контролю і може поширюватись у тілі листа, не виходячи на поверхню, внаслідок зміцнення поверхні листа та утворення залишкових стискуючих напружень при заклепуванні. Поширення прихованої тріщини зменшує несучу здатність і може викликати раптове катастрофічне руйнування неушкодженої зовні конструкції.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Важливим завданням є визначення початкового втомного пошкодження у формі короткої тріщини, яка ініціюється під головкою заклепки в основному матеріалі алюмінієвого листа, що знаходиться під накладкою і закритий для візуального спостереження. Для цього використовують відповідні методи неруйнівного контролю, які дозволяють з достатньою точністю встановити наявність пошкодження та проконтролювати його параметри [1, 2].

Вихрострумовий метод має ряд переваг перед іншими методами неруйнівного контролю. Це такі: можливість контролю бокової стінки отвору; можливість контролю по неочищеній поверхні; відсутність потреби у використанні контактних рідин;

невеликі габарити і вага обладнання. Дефектоскопи типу ОКО-01 і ВД 3-71 мають достатню чутливість при під'єднанні низькочастотних вихрострумівих перетворювачів, що дозволяє виявляти не тільки поверхневі, але й підповерхневі дефекти, зокрема в багатошарових авіаційних конструкціях [3]. Використання цього методу має важливе значення для діагностики вузлів авіаційної техніки в процесі експлуатації й технічного обслуговування, дозволяє оптимізувати процес діагностики, а також точність контролю [3-6].

**Мета роботи.** Визначення місця зародження первинного пошкодження матеріалу до моменту його візуалізації методом вихрострумової дефектоскопії, а також дослідження втомної довговічності зразків із алюмінієвого сплаву 2024-T3.

**Методика дослідження.** Зразки для досліджень виготовляли з алюмінієвого сплаву 2024-T3, який широко використовується в авіації як зовнішнє покриття крил та фюзеляжу літаків. Хімічний склад і механічні властивості матеріалу наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Хімічний склад і механічні властивості алюмінієвого сплаву 2024-T3

Хімічний склад (%)					
2024-T3	Cu	Mg	Mn	Fe	Zn
		3,82-4,04	1,75-1,77	0,56	0,08-0,18
Механічні властивості в напрямку прокату					
	$\sigma_B$ , МПа		$\sigma_{0,2}$ , МПа		$\Delta$ , %
	459 - 466		339 - 345		21,5 - 24,7

Зразки вирізували у напрямку прокату з двосторонньо платерованих алюмінієвих листів товщиною 3 мм. Для досліджень використовували уніфіковані зразки розміром 80×250 мм (рис. 1а). Отвори під заклепки виконували таким чином, щоб головки заклепок максимально прилягали до площини пластини і перехід на границі головка–пластина був мінімальний. Пластини з'єднували трьома рядами заклепок по три в кожному (рис. 1б) на пресі з формуванням півсферичної замикаючої головки. Закладна частина пластин становила 80 мм.

Дослідження виконували на випробувальній машині „Инстрон” за циклічного навантаження сталою амплітудою  $\Delta\sigma=100\text{MPa}$  при частоті 15 Гц з коефіцієнтами асиметрії циклу  $R=0,15; 0,3; 0,5$  (тут  $R=\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ ;  $\sigma_{\min}$ ,  $\sigma_{\max}$  – мінімальне і максимальне напруження циклу).

Програмою випробувань було передбачено дослідження зразків з отворами під стержень заклепки (підкладка) та головку (накладка) у заклепаному стані.

Для контролю пошкоджуваності матеріалу використовували вихрострумівий дефектоскоп ВД 3-71 з датчиком трансформаторного типу ПН-12 МДФ 01. Основні параметри пристрою – на рис. 2.

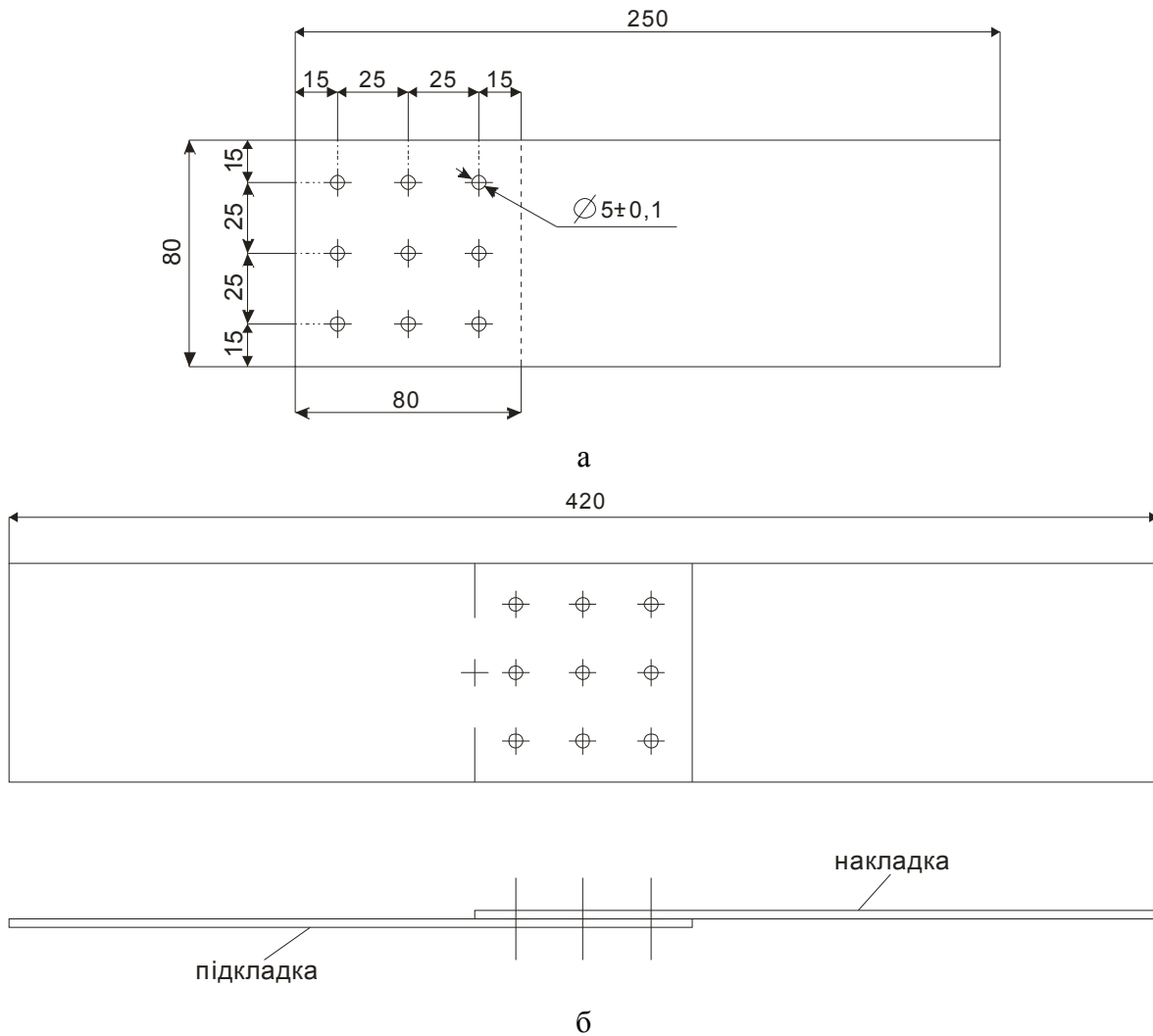


Рисунок 1 – Креслення зразків для досліджень: а – уніфікований зразок; б – зразок для випробувань

Дослідження виконували на випробувальній машині „Інстрон” за циклічного навантаження сталюю амплітудою  $\Delta\sigma=100\text{MPa}$ , при частоті 15 Гц з коефіцієнтами асиметрії циклу  $R=0,15; 0,3; 0,5$ , (тут  $R=\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ ;  $\sigma_{\min}$ ,  $\sigma_{\max}$  – мінімальне і максимальне напруження циклу).



Основні технічні параметри	
Інтервал робочої частоти	500 Гц – 6 МГц
Напруга на виході генератора	від 0,5 до 8 В
Розмір регульованого коефіцієнта підсилення	52 Дб
Розмір сканованого сигналу	1:100
Частота дискретизації	до 3000 зв./с
Датчик типу ПН–12 МДФ 01	

Рисунок 2 – Вихрострумний дефектоскоп ВД 3-71

Програмою випробувань було передбачено дослідження зразків з отворами під стержень заклепки (підкладка) та головку (накладка) у заклепаному стані.

Для контролю пошкоджуваності матеріалу використовували вихрострумний дефектоскоп ВД 3-71 з датчиком трансформаторного типу ПН-12 МДФ 01. Основні параметри пристрою подано на рис. 2.

Оскільки датчик використовували в захисному кожусі, то коефіцієнт підсилення був близько 8В, частота дискретизації встановлювалась автоматично і складала 250 звернень за секунду. Для сигналізації росту пошкодження встановлювали величину граничного пошкодження. При перевищенні сигналом встановленого ліміту додатково запалювався світлодіод та вмикалася звукова сигналізація. Всі виміри здійснювали з боку конусного отвору під головку заклепки, зверху-вниз, зліва-направо в напрямку, перпендикулярному до передбачуваної тріщини (рис. 3). Результат кожного виміру попередньо аналізували на екрані дефектоскопа, тоді записували до пам'яті пристрою для подальшого аналізу в середовищі комп'ютерної програми ВД 3-71.

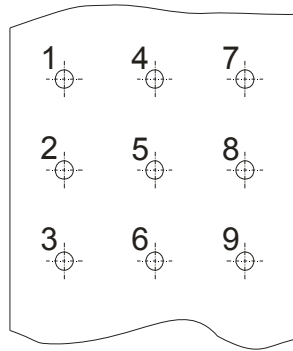


Рисунок 3 – Номери отворів із заклепками

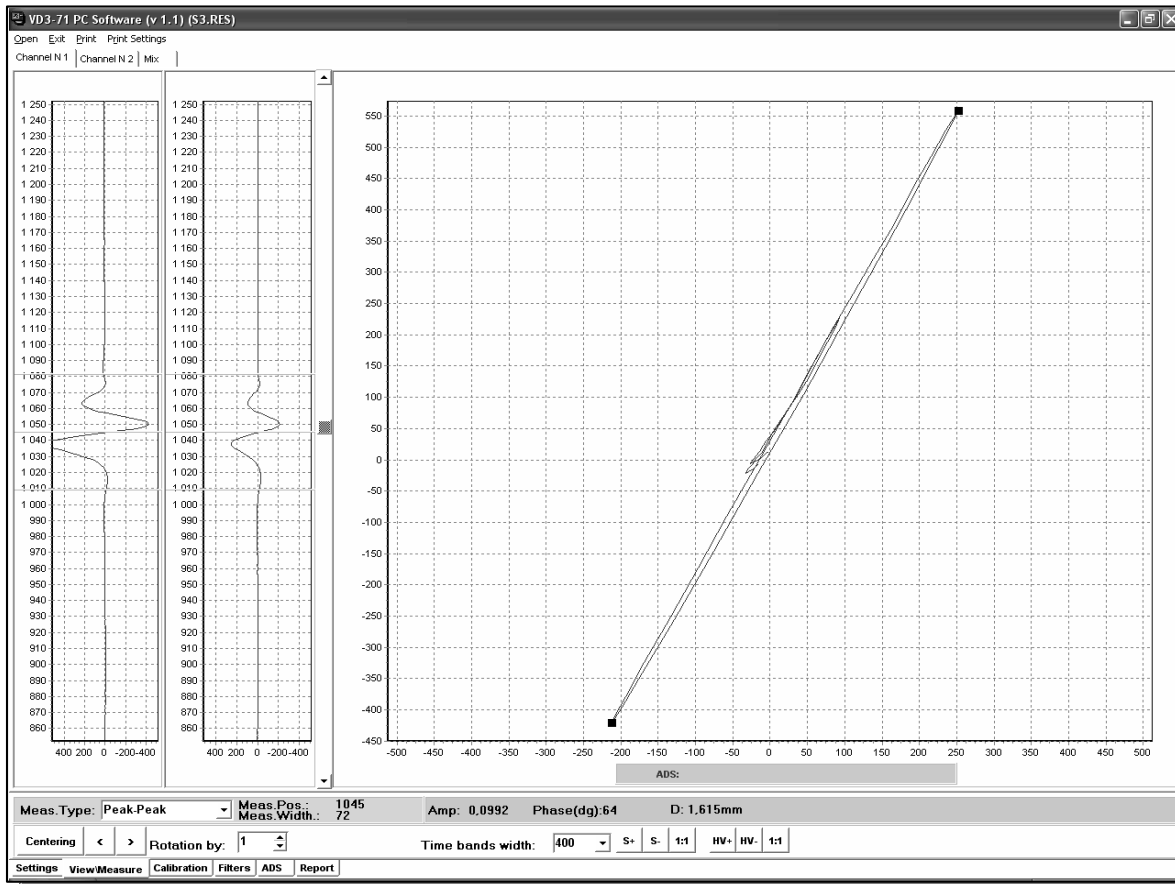


Рисунок 4 – Інтерфейс комп'ютерної програми ВД 3-71

На рис. 4 зображено інтерфейс програми ВД 3-71. З лівого боку відображається сигнал у часі по двох каналах, правий бік – комплексна площина. Отвір відтворюється у формі двох піків у часі, а на комплексній площині відповідно петлею. Пошкодження спотворює форму петлі на комплексній площині та викривляє один з піків на графіку залежності сигналу від часу.

Встановлено граничні розміри початкового пошкодження у формі короткої тріщини, довжиною 500 мкм та шириною 30 мкм, яка чітко виявлялася дефектоскопом під головкою заклепки.

Виміри проводили до моменту, коли пошкодження перевищувало 3 мм, тобто товщину зразка, або до моменту, коли тріщину виявляли на поверхні довжиною 1 мм. На всіх зразках обстеження проводили тільки з боку головок заклепок, оскільки вона ослаблена за рахунок зменшення товщини конусом під головку заклепки, а в підкладці товщина листа збережена повністю (рис. 5).

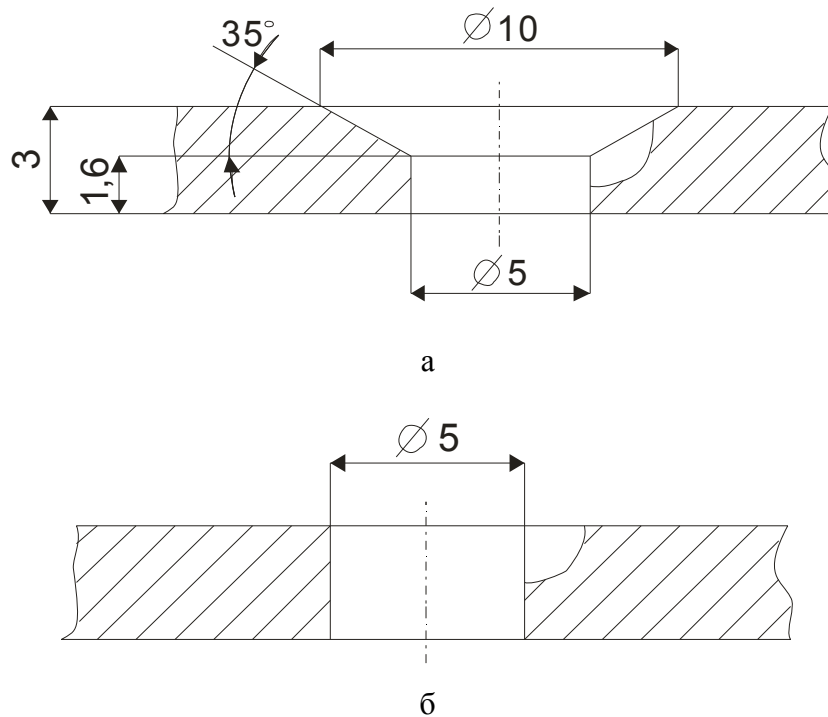


Рисунок 5 – Форми отворів і тріщини в накладці – а); підкладці – б)

**Результати розрахунків та їх обговорення.** Появу початкового пошкодження у формі короткої тріщини, яке в нашому випадку прийняли довжиною 500 мкм та шириною 30 мкм, виявляли після  $5 \times 10^4$ — $10^5$  циклів, що складало 0,2—0,35 загальної кількості циклів до руйнування з'єднання. Причому за асиметрій  $R=0,15$ ;  $R=0,3$ ;  $R=0,5$  кількість циклів до виявлення початкового пошкодження була однаковою.

Пошкодження для різних отворів зразків, залежно від кількості циклів навантаження при  $R=0,15$ , зображено на рис. 6. На рисунку проведено лінії, які відповідають загальній товщині листа (3 мм) та переходу конусної ділянки отвору в циліндричну (1,4 мм). Нижня ділянка відповідає пошкодженням, які з'явилися на поверхні конусного отвору, а також плоскій зовнішньої поверхні біля нього. Друга ділянка, обмежена лініями від 1,4 мм до 3 мм, відповідає циліндричній частині отвору, де також зароджуються короткі втомні тріщини. Хоча товщина листа 3 мм, остання ділянка вище лінії 3 мм. Наявність таких точок зумовлена тим, що тріщина проросла і вийшла на внутрішню поверхню накладки.

Початкове пошкодження після  $5 \times 10^4$ — $10^5$  циклів виявляли переважно в середній частині листа на глибині близько 1,4-2,4 мм, що відповідає переходу конусної

ділянки отвору в циліндричну (рис. 6). Необхідно наголосити, що вихрострумовий дефектоскоп виявляє глибину розташування пошкоджень відносно зовнішньої поверхні. Зі збільшенням кількості циклів навантаження пошкодження виявляли ближче до внутрішньої поверхні, що зумовлено проростанням тріщини по товщині листа. Виявлення пошкоджень ближче до зовнішньої поверхні зі збільшенням циклів навантаження зумовлено ефектом розвантаження тріщини і малого розкриття за рахунок проростання тріщин в інших отворах і перерозподілу розкриття.

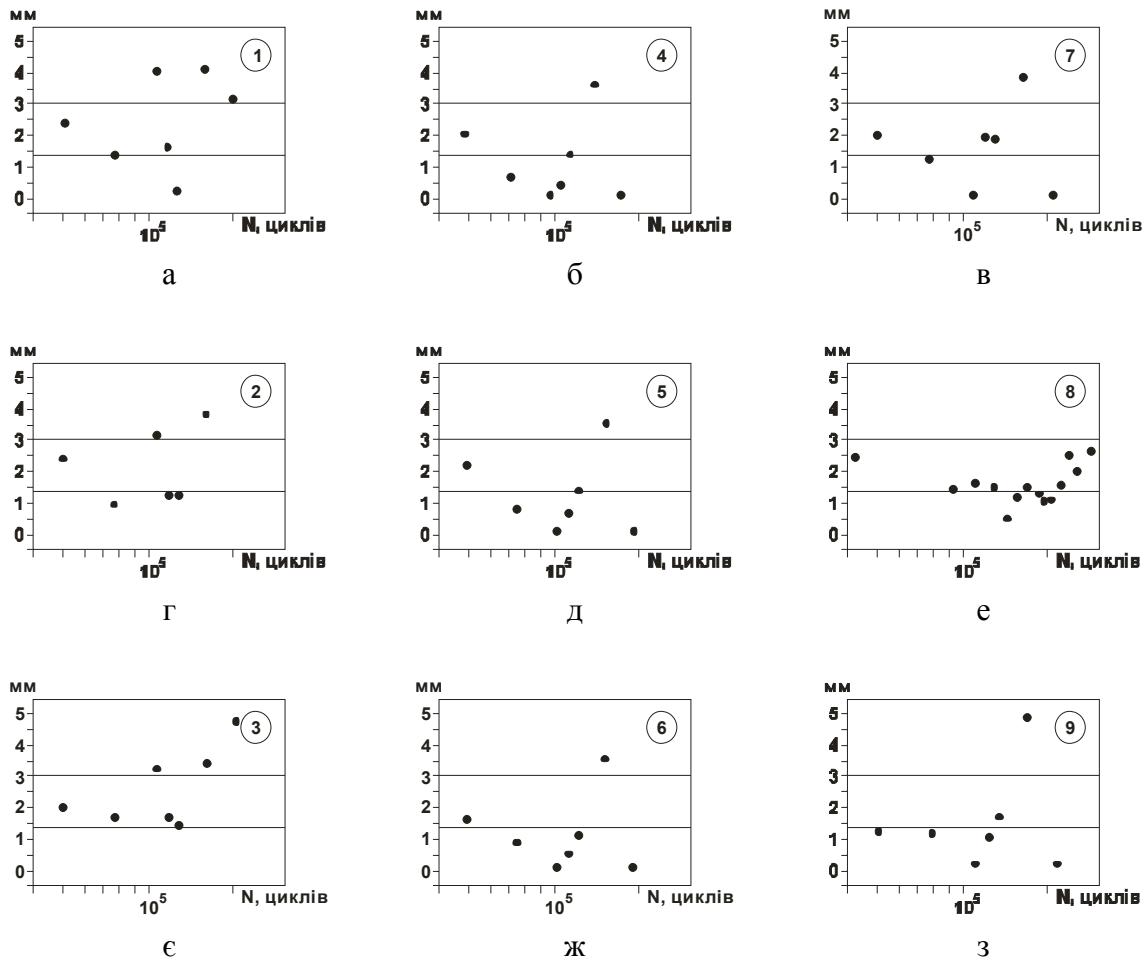


Рисунок 6 – Залежність локалізації виявлених дефектів від кількості циклів навантаження для різних отворів за  $R=0,15$ : 1–9 – номери отворів зразка

У кожному отворі першого ряду (отвори 1, 4, 7) спостерігається перевищення товщини листа, тобто ці отвори були ініціаторами наскрізних тріщин. У більшості отворів (1–8) тріщини зароджуються на глибині 1,8–2,4 мм біля конусного отвору під головку заклепки.

Останній ряд отворів (3, 6, 9) характеризуються наскрізною тріщиною при отворі 3, а також поверхневими тріщинами. В отворах 6, 9 при кінцевих циклах навантаження відбувається поширення наскрізних тріщин.

Тріщини біля отворів 2, 5, 8 зароджуються на поверхні конуса, а також у глибині зразка. Наскрізні тріщини біля отворів 2, 5 подібні до попередніх. Біля отвору 8 виходу тріщини на поверхню не виявлено. Тріщини поширюються біля отворів 2, 5, 8, що призводить до руйнування цього перерізу. Це підтверджено результатами майже всіх тестів: у 95% досліджувані зразки руйнувалися вздовж центрального ряду отворів.

На рис. 7 зображено розкид глибини розташування коротких втомних тріщин по товщині листа. На цій діаграмі по осі X – номер отвору, по Y – товщина листа. Велика кількість точок зумовлена вимірюванням кількох зразків. На діаграмі позначено дві

горизонтальні пунктирні лінії, одна відповідає товщині конічної ділянки отвору 1,4 мм, а також 3 мм (загальна товщина листа). Лінії утворюють три ділянки одна над одною. На дослідні дані нанесено криві максимуму (С), мінімуму (А), а також середнє значення (В).

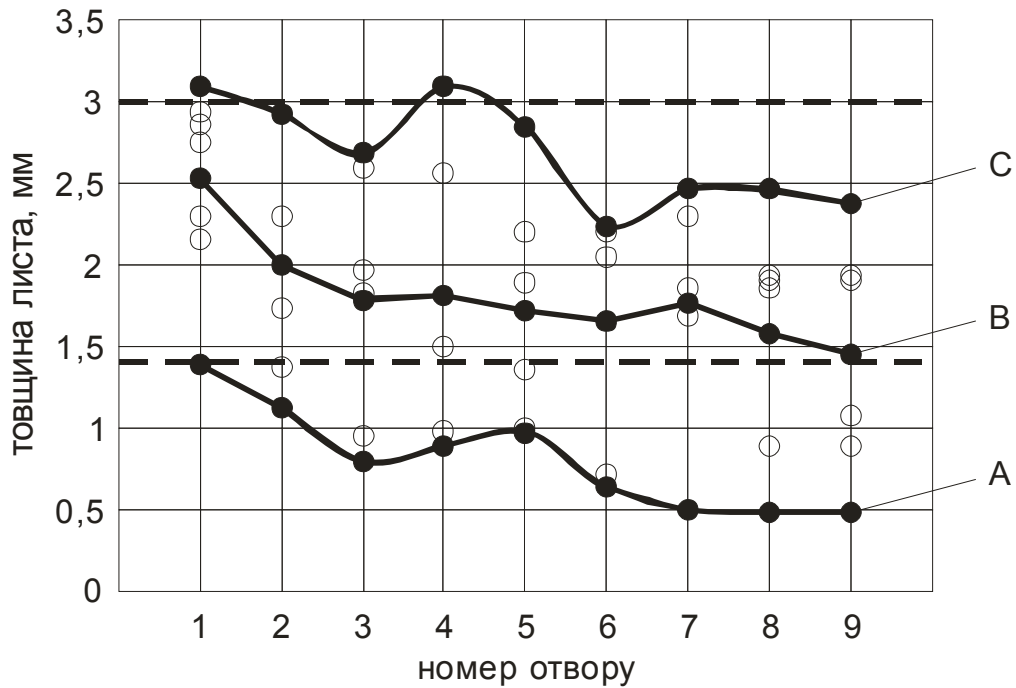


Рисунок 7 – Розкид вимірів глибини розташування пошкоджень (R=0,15): крива А – максимум; крива В – середнє значення; крива С – мінімум

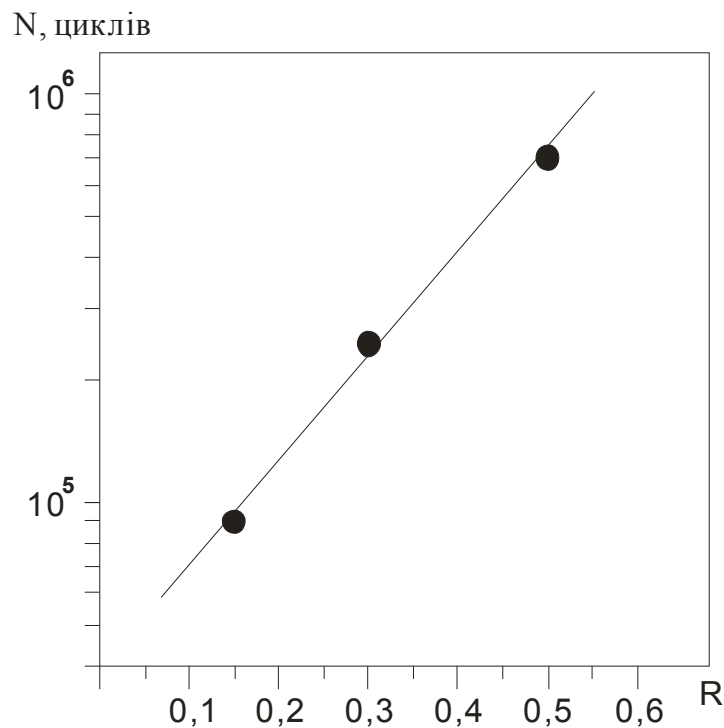


Рисунок 8 – Втомна довговічність заклепаного з’єднання за асиметрії циклу навантаження R=0,15; R=0,3; R=0,5, при розмаху напруження Δσ=100МПа

Як було встановлено раніше, основна причина руйнування заклепувального з'єднання зародження і поширення втомної тріщин у накладці. Виявлення початкових пошкоджень у накладці не залежало від асиметрії циклу навантаження, проте загальна кількість циклів до руйнування істотно відрізнялася.

На рис. 8 зображено втомну довговічність заклепаних зразків за різних коефіцієнтів асиметрії циклу навантаження  $R=0,15; 0,3; 0,5$ .

З діаграми бачимо, що при сталому розмаху напруження  $\Delta\sigma=100$  МПа зі зростанням коефіцієнта асиметрії циклу з 0,15 до 0,5 втомна довговічність заклепаного з'єднання збільшилася майже на один порядок, від  $10^5$  до  $10^6$  циклів. Руйнування зразка відбувалося внаслідок розвитку мінімум трьох тріщин, ініціаторами яких були заклепочні отвори в накладці.

### Висновки

На основі проведених досліджень опрацьовано методику визначення первинного мікропошкодження елементів заклепочного з'єднання за допомогою використання вихрострумового дефектоскопа. Встановлено, що початкове пошкодження у формі короткої тріщини довжиною 500 мкм та шириною 30 мкм виявляється після  $5 \times 10^4$ — $10^5$  циклів навантаження незалежно від асиметрії циклу навантаження. Кількість циклів до появи пошкодження даних розмірів складала 0,2—0,35 загальної кількості циклів до руйнування.

Початкове пошкодження виникає в середній частині листа накладки, що відповідає переходу конусної ділянки отвору в циліндричну. Поширення втомної тріщини відбувається в обидва боки з виходом на поверхню листа.

Втомна довговічність зразків істотно залежить від асиметрії циклу навантаження і збільшується на порядок при зміні асиметрії від 0,15 до 0,5.

Представлені результати показують можливість ефективного використання дефектоскопа ВД 3-71 для перевірки нероз'ємних вузлів обшивки крил та фюзеляжу літальних апаратів.

### Література

1. Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. посібник / Під заг. ред. В.В. Панасюка. Т.10: Міцність та довговічність нафтогазового обладнання / В.І. Похмурський, Є.І. Крижанівський, В.М. Івасів та ін. – Львів–Івано-Франківськ: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України; Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 2006. – С. 987–1004.
2. Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. посібник / Під заг. ред. В.В. Панасюка. Т.5: Неруйнівний контроль і технічна діагностика / Під ред. З.Т. Назарчука. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2001. – С. 39–57.
3. Универсальные вихретоковые дефектоскопы ОКО-01 и ВД 3-71 и их применение для выявления скрытых дефектов в неразъемных узлах авиационной техники / В.Н. Учанин, Г.Г. Луценко, А.В. Джаганян [и др.] // Матеріали науково-техн. конф. „Неруйнівний контроль” – Київ, 2007. – С. 139–146.
4. Учанин В.Н. Вихретоковые методы выявления дефектов в зоне заклепок многослойных авиационных конструкций / В.Н. Учанин // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2006. – № 2. – С. 3–12.
5. Учанин В.Н. Вихретоковый метод выявления поверхностных дефектов узлов авиационной техники в условиях эксплуатации / В.Н. Учанин, В.Я. Дереча // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2006. – № 4. – С. 20 – 28.
6. Hutsaylyuk V. Fatigue damage of rivet joints in the condition of stable cyclic load / V. Hutsaylyuk, L. Sniezek, V. Hlado // Fatigue of Aircraft Structures. Monographic series ISSUE 2009. Warsaw, 2009. – P. 63–73.

Одержано 06.04.2010 р.