

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Семенцова Віктора Федоровича «Конструктивно-технологічні методи забезпечення ресурсу планера літака в зонах функціональних отворів», що представлена на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук по спеціальності 05.07.02 – проектування, виробництва та випробування літальних апаратів

1. Оцінка структури та змісту дисертації

Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків та списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації становить – 176 сторінок, з них 145 сторінок основного тексту, 195 рисунків і 6 таблиць, список використаних джерел з 91 найменувань на 8 сторінках.

Структура роботи по складу і послідовності розділів логічна та в цілому відповідає необхідним вимогам.

У вступі наведена загальна характеристика роботи, обґрунтована актуальність теми та показаний зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами реалізації стратегії розвитку авіаційної промисловості України до 2020 року. Сформульовано мету і задачі дослідження, дана характеристика об'єкта, предмета та методів дослідження. Відзначено особистий внесок здобувача, сформульована наукова новизна та практична цінність отриманих результатів, наведені дані по апробації роботи.

В першому розділі виконано аналіз конструктивних способів підвищення довговічності (форма отворів, їх взаємне розташування, параметри місцевого потовщення, тощо), який показав:

- 1) отвір в стрінгері знижує витривалість регулярної зони більш ніж в 5 разів;
- 2) використання трьох або п'яти отворів, а також використання складної форми отвору (овальних) значно (2,4-2,9 разів) підвищує витривалість конструкції;
- 3) місцеве зміцнення вертикальної полки стрингера за рахунок збільшення товщини у 1,5 рази дає збільшення витривалості в 2,45 рази, а при

симетричному зміцненні - в 3,5 рази.

При цьому відмічено, що використання отворів складної форми а також місцевого зміцнення за рахунок потовщення полотна, які дають позитивний ефект, в серійному виробництві значним чином ускладнює технологію та трудомісткість виготовлення.

Показано, що використання технологічних способів більш ефективно. Ці методи, як правило заключаються в обробці елементів конструкції в зоні функціональних отворів методами пластичного деформування металу.

Для подальшого дослідження впливу пластичного деформування вільних (функціональних) отворів автором обрани процес дорнування (деформуючого протягування), метод глибокого пластичного деформування (МГПД) шляхом штампування лунок сегментної конфігурації довкола отвору, що розташовані поперек силового потоку а також розкатування.

В результаті аналізу автором показано, що всі параметри використання конструктивних та технологічних способів підвищення втомної довговічності отримані експериментально. Немає узагальнених рекомендацій щодо їх ефективного використання.

Тому в роботі показана необхідність використання конструкторсько-технологічних методів підвищення ресурсу, які б забезпечували всі позитивні риси конструктивних та технологічних способів.

В результаті проведеного аналізу автором грамотно сформульована мета та задачі дослідження

У другому розділі наведено розроблений автором метод аналізу впливу конструктивно-технологічних параметрів на характеристики локального НДС конструктивних елементів планера літака з функціональними отворами у вигляді алгоритму прийняття рішень, який реалізовано для аналізу впливу потовщення, розкочування, дорнування, обтиснення на характеристики локального НДС конструктивних елементів планера літака із урахуванням історії навантаження.

В якості критерію оцінки втомної довговічності в дисертації обґрунтовано вибрана величина питомої енергії деформування в локальних зонах її концентрації у вигляді добутку еквівалентного напруження на еквівалентну деформацію ($W = \sigma_{0екв} \cdot \epsilon_{0екв}$). Питома енергія є узагальненою,

інтегрованою характеристикою НДС, тому більш повно відображає стан металу конструкції при навантаженні.

З використанням розробленого автором методу аналізу в дисертації досліджено вплив одностороннього та двостороннього потовщення смуги в зоні отвору, а також технологічних операцій дорнування, обтиснення, розкочування в зоні отвору на характеристики локального НДС смуги з отвором при розтягуванні.

При дослідженні встановлено, що для смуги з отвором в діапазоні значень напружень у перерізі від 100 до 200 МПа застосування одностороннього потовщення в зоні отвору сприяє зменшенню максимальних головних розтягуючих напружень еквівалентного віднульового циклу в 1,03 – 1,1 рази в порівнянні з напруженням в смузі з отвором підсилення. При цьому величини максимальних головних розтягуючих деформацій і максимальної питомої енергії деформування еквівалентного віднульового циклу зменшуються в 1,04 рази та 1,03 – 1,14 рази відповідно.

Досліджено вплив величини двостороннього потовщення в зоні отвору на характеристики локального НДС смуги з отвором при її розтягуванні. Встановлено, що для смуги ($\delta = 5$ мм) з отвором $\varnothing 8$ мм в діапазоні значень напружень у перерізі від 100 до 200 МПа застосування двостороннього потовщення в зоні отвору в 1,2 – 1,7 рази сприяє зменшенню максимальних головних розтягуючих напружень еквівалентного віднульового циклу в 1,1 – 1,7 рази в порівнянні з напруженням в смузі з отвором без посилення. При цьому величини максимальних головних розтягуючих деформацій і максимальної питомої енергії деформування еквівалентного віднульового циклу зменшуються в 1,02 – 1,67 рази і 1,2 – 2,8 рази відповідно.

Досліджено вплив величини радіального натягу при дорнуванні і рівня навантаження при розтягуванні на характеристики локального НДС розтягнутої смуги з отвором. Встановлено, що для смуги з отвором в діапазоні значень напружень у перерізі від 100 до 200 МПа застосування дорнування стінок отвору з радіальним натягом від 1 до 3% сприяє зменшенню максимальних головних розтягуючих напружень еквівалентних віднульового циклу в 1,1 – 2,2 рази в порівнянні з напруженням в смузі з отвором.

При цьому величини максимальних головних розтягуючих деформацій і максимальної питомої енергії деформування еквівалентного віднульового циклу зменшуються в 1,2 – 2 рази і 1,2 – 4,5 рази відповідно.

Досліджено вплив бар'єрного обтиснення смуги в зоні отвору на характеристики локального НДС. Проаналізовано вплив радіуса, на якому розташована обжимка, і рівня навантаження на характеристики локального НДС смуги з отвором. Застосування сегментного обтиску на глибину 0,3 мм сприяє зменшенню максимальних головних розтягуючих напружень еквівалентного віднульового циклу в 1,5 – 2,2 рази в перерізі по осі отвору і в 1,4 – 1,7 рази в зоні обтиску по відношенню до напружень для смуги з отвором.

Досліджено вплив конструктивно-технологічних параметрів на характеристики локального НДС пластини з отвором при навантаженні її зсувом. Встановлено, що для пластини з отвором при навантаженні її зсувом в діапазоні значень напружень у перерізі бруто від 50 до 200 МПа застосування кільцевого обтиску на глибину 0,3 мм сприяє зменшенню максимальних головних розтягуючих напружень еквівалентного віднульового циклу в 2,2 – 1,03 рази. При цьому величини максимальних головних розтягуючих деформацій та максимальної питомої енергії деформування еквівалентного віднульового циклу зменшуються в 1,8 – 1,03 рази і 3,9 – 1,05 рази відповідно.

Проведені експериментальні дослідження з отвором і системою отворів показали, що втомна довговічність смуги з трьома отворами вище втомної довговічності смуги з одним отвором від 1,6 до 2 разів на експлуатаційних рівнях навантаження.

Розроблені методи аналізу впливу локального пластичного деформування в зоні функціональних отворів конструктивних елементів планера літака з використанням потовщення, розкатки, дорнування та обтиснення на характеристики локального НДС, проведені експериментальні дослідження по визначенню характеристик втомної довговічності смуги з отвором і системою отворів є науковим обґрунтуванням конструктивно-технологічних методів забезпечення ресурсу планера літака в зонах функціональних отворів.

В третьому розділі наведені результати дослідження впливу

локального пластичного деформування в зоні функціональних отворів конструктивних елементів планера літака на характеристики НДС з використанням системи інженерного аналізу ANSYS.

В якості конструктивних елементів, що моделюють конструктивно-силові елементи планера з функціональними отворами, вибрані типові елементи – смуга та z-образний профіль з отворами, які навантажені змінною силою. Матеріал смуги – сплав Д16чТ, а матеріал стрингера – сплав 1163Т.

Розглянутий вплив методів оброблення смуг і стрингерів у зоні отворів на зміну максимальної питомої енергії деформування еквівалентного віднульованого циклу з різними параметрами розкочування, обтиснення при дорнуванні, глибини обтиснення сегментних лунок та використанням фасок $0,5 \times 45^\circ$. Порівняння виконано з базовим варіантом отворів без оброблення.

У результаті чисельного дослідження НДС смуги з отворами встановлено, що застосування зазначених методів оброблення приводить до зниження максимальної питомої енергії деформування в 1,03-3,9 рази порівняно зі смугою з одним отвором і в 1,03-4,75 рази порівняно зі смугою з системою отворів.

При аналізі НДС стрингерів встановлено, що застосування зазначених конструктивних і технологічних методів приводить до зниження максимальної питомої енергії деформування еквівалентного віднульованого циклу в 1,1-3,9 рази порівняно з базовими варіантами ($k_{W_{ord}} = 0,9 \dots 0,26$).

В результаті чисельних досліджень конструктивно-технологічних параметрів смуг і стрингерів із системою функціональних отворів встановлено:

- відносний натяг при дорнуванні стінок отворів має становити 2...3%;
- відносний натяг при розкочуванні отворів має незначний вплив на зміну питомої енергії деформування і може становити 0,2...0,6%;
- глибина бар'єрного обтискання в дослідженому діапазоні значень має незначний вплив на зміну питомої енергії деформування при обробленні може становити 0,2...0,6 мм.

За результатами чисельних досліджень, як базовий конструкційний

варіант виконання отворів прийнято варіант з трьома отворами діаметром 8мм ($l = 12$ мм) і технологічні методи оброблення конструктивних елементів у зоні отворів:

- розкочування отворів із відносним натягом 0,2...0,6%;
- дорнування стінок отворів з відносним радіальним натягом 2...3%;
- бар'єрне обтиснення методом виштамповування сегментних лунок із глибиною обтиску до 0,3 мм.

В четвертому розділі наведені результати експериментальних досліджень з визначення впливу методів обробки конструктивних елементів планера літака в зонах функціональних отворів на їх статичну міцність і втомну довговічність.

Експериментальні дослідження здійснювали на атестованих установках для проведення втомних і статичних випробувань МУП-50, електромеханічній машині УММ-02 та на гідравлічній установці для втомних і статичних випробувань ЦДМ-10ПУ.

Випробування зразків з пресованого профілю (матеріал Д16Т) проводили на експлуатаційних рівнях навантаження. Досліджено такі варіанти оброблення:

- розкочування стінок отворів з відносним радіальним натягом $\Delta = 0.2$ та 0,6 %;
- дорнування стінок отворів з відносним радіальним натягом $\Delta = 2$ та 3 %;
- дорнування стінок отворів ($\Delta = 2$ %) та обтиснення фасок;
- оброблення смуги в зоні отворів бар'єрним обтисненням методом виштамповування лунок сегментної конфігурації;
- оброблення смуги в зоні отворів бар'єрним обтисненням методом виштамповування лунок сегментної конфігурації й обтиснення фасок;
- обтиснення фасок.

Аналіз результатів втомних випробувань смуг із трьома функціональними отворами, оброблених в зоні отворів, дозволив автору записати аналітичні вирази для кривих втоми у вигляді ступеневих залежностей для різних видів оброблення отворів.

За даними експериментальних та аналітичних досліджень побудовано графіки кривих втоми для смуг із отворами, які свідчать про добре співпадіння результатів.

Проведено експериментальні дослідження впливу методів оброблення на втомну довговічність конструктивно-подібних зразків стрингерів з функціональними отворами. Після виконання отворів та оброблення стрингерів у зоні функціональних отворів розкочуванням з відносним радіальним натягом $\Delta = 0,3\%$, дорнуванням стінок отворів ($\Delta = 3\%$), бар'єрним обтисненням методом виштамповування сегментних лунок зразки пройшли дробоструминну обробку стінки стрингера (з двох сторін) в зоні отворів. Після дробоструминної обробки на зразки було нанесено покриття Ан.Окс.нхр. за серійною технологією авіаційного підприємства.

Встановлено, що при обробленні конструктивно-подібних зразків стрингерів в зоні отворів бар'єрним обтисненням методом виштамповування сегментних лунок та дорнуванням довговічність стрингера в зоні отворів для перетікання палива на рівні навантаження $\sigma_{бр \text{ min}} = -30 \text{ МПа}$, $\sigma_{бр \text{ max}} = 100 \text{ МПа}$ перевищує 10^6 циклів навантаження та забезпечує досягнення проектного ресурсу.

В п'ятому розділі наведені результати розробки технології та засобів оснащення процесів оброблення конструктивних елементів планера літака в зонах функціональних отворів.

На основі попередніх розрахункових та експериментальних досліджень процесів розкочування, дорнування, бар'єрного обтиснення встановлені значення конструкторсько-технологічних параметрів обробки зон функціональних отворів.

Встановлено рекомендуємий діапазон відносного радіального натягу при розкочуванні стінок функціональних отворів, який повинен знаходитись у діапазоні від 0,25 до 0,06%. Рекомендуємий діапазон відносного натягу для дорнування становить від 2,5 до 3,0%, а для бар'єрного обтиснення виштамповування лунок сегментної конфігурації – глибиною від 0,2 до 0,4 мм.

Для забезпечення точності та стабільності виконання процесів обробки розроблено відповідне оснащення, характеристики якого наведені в дисертації.

Виконаний автором комплексне оцінювання показників техніко-економічної ефективності методів обробки дозволив ранжувати методи обробки зон функціональних отворів таким чином:

1. Дорнування отворів з відносним натягом – 2,5...3,0%;
2. Бар'єрне обтиснення методом виштамповування сегментних лунок глибиною від 0,2 до 0,3 мм у зоні функціональних отворів;
3. Розкочування з відносним натягом 0,25...0,6%.

Результати впроваджені у виробництво ДП «АНТОНОВ», ХДАВП і в навчальний процес національного аерокосмічного університету ім. Н.С. Жуковського, «Харківський авіаційний інститут», що підтверджено відповідними актами.

2. Актуальність роботи.

Внаслідок високої конкуренції на сучасному ринку літаків транспортної категорії посилюються вимоги до їх ресурсу та безпеки польотів. Більшість літаків транспортної категорії вітчизняного та зарубіжного виробництва проектується з урахуванням заданого ресурсу, величина якого знаходиться в діапазоні від 20 тисяч польотів (60 тисяч льотних годин) для важких літаків до 60 тисяч польотів (80 тисяч льотних годин) для середньомагістральних літаків з терміном їх експлуатації не менше 25 – 30 років.

Для збереження конкурентоспроможності вітчизняного літакобудування на світовому ринку авіаційних і транспортних послуг необхідно удосконалювати методи конструкторсько-технологічного забезпечення ресурсу та надійності конструкції літаків для використання їх на етапах проектування, виробництва й експлуатації.

Багато в чому ресурс планера літака визначається ресурсом конструктивних елементів з функціональними отворами.

Таким чином, розроблення конструктивно-технологічних методів забезпечення ресурсу планера літака в зонах функціональних отворів є

актуальним науково-технічною задачею, а створення методів і способів досягнення регламентованих ресурсних характеристик елементів конструкції планера літака має велике практичне значення у вирішенні проблеми забезпечення безпеки польотів в умовах тривалої експлуатації літаків.

3. Наукова новизна отриманих результатів

При виконанні роботи автором отримані суттєві, результати, які складають наукову новизну:

1) Розроблено наукові основи застосування методів локального пластичного деформування конструктивних елементів планера літака в зонах функціональних отворів для підвищення їх втомної довговічності шляхом вибору конструктивних параметрів і технологічних способів оброблення розкочуванням, дорнуванням і бар'єрним обтисненням.

2) Удосконалено методи визначення характеристик локального напружено-деформованого стану конструктивних елементів планера літака в зонах функціональних отворів шляхом урахування технології оброблення та історії їх навантаження за допомогою системи CAD/CAE ANSYS.

4. Отримані наукові результати мають певне значення для науки

Встановлені автором методи визначення, а також закономірності впливу конструктивно-технологічних параметрів на характеристики локального НДС розширюють уявлення щодо процесів пластичної обробки деформуванням в зоні функціональних отворів конструктивних елементів планера літака. Це дає можливість з використанням методу аналізу впливу конструкторсько-технологічних параметрів прогнозувати оптимізовані конструкторські і технологічні рішення при використанні процесів дорнування, бар'єрного обтиснення та розкочування отворів в безпечних конструкціях з визначеним рівнем довговічності.

5. Практична значимість та цінність отриманих результатів.

Практичну цінність дисертаційної роботи складають такі результати:

1) Конструктивно-технологічні методи забезпечення ресурсу планера літака в зонах функціональних отворів (потовщення, розкочування, дорнування, бар'єрне обтиснення) дозволяють підвищити втомну довговічність в 2 - 10 разів на експлуатаційних рівнях навантаження та

досягти заданих ресурсних характеристик елементів конструкції без збільшення маси конструкції;

2) Розроблені технології та засоби оснащення для оброблення конструктивних елементів планера літака в зоні функціональних отворів методами дорнування, розкочування і бар'єрного обтиснення забезпечують технологічну точність і стабільність процесів оброблення;

3) Результати дисертаційної роботи, впроваджено у виробництво на ДП «АНТОНОВ», ХДАВП і в навчальний процес Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут».

6. Достовірність отриманих результатів полягає у вирішенні поставлених завдань з застосуванням: методів скінченних елементів, реалізованих в системі CAD/CAE ANSYS; розрахунково-експериментальних методів визначення впливу конструктивно-технологічних параметрів на характеристики опору втоми; методів параметричного тривимірного моделювання за допомогою системи CAD/CAM/CAE/PLM Siemens NX; експериментальних методів дослідження характеристик опору втоми типових конструктивних елементів; технологічних методів виробництва конструктивних елементів з функціональними отворами.

Адекватність розрахункових моделей перевірено при втомних випробуваннях типових конструктивно-подібних зразків із функціональними отворами.

7. Повнота викладення в опублікованих роботах основних наукових та прикладних результатів дисертації.

За результатами досліджень опубліковано 13 наукових праць. Серед них - 1 наукове видання, 7 статей (2 без співавторів) у наукових журналах, включених до переліку наукових видань України для публікації результатів кваліфікаційних робіт і включених до міжнародної наукометричної бази даних Index Copernicus та 5 публікацій у матеріалах конференцій та тезах доповідей.

Публікації відповідають встановленим вимогам та достатньо повно відображають зміст і основні результати дисертації.

Особистий внесок автора в роботах, що опубліковані, охоплює

основні науково-практичні результати дисертації, складає наукову новизну та практичну значимість.

8. Зауваження по тексту дисертації та автореферату

1. В дисертації запропоновано метод аналізу впливу конструктивно-технологічних параметрів на характеристики локального НДС конструктивних елементів планера літака, який представлено на рис. 2.1. Вибір форми представлення у вигляді алгоритму прийняття рішень позитивно дає уявлення щодо процесу вибору конструктивно-технологічних рішень, але в тексті необхідно було б більш повно описати цей алгоритм, як один з ключових елементів наукової новизни. При цьому методично правильно було б текст на стор. 38 та 39 дисертації виділити в окремий підрозділ розділу 2.

2. На основі чисельного моделювання процесу дорнування автором показано, що в зоні контакту дорна зі стінкою виникає переміщення матеріалу в осьовому напрямку (рис. 2.30). Це визиває радіальні переміщення матеріалу в стінках отворів, як це показано на рис.2.31. Це явище характеризується деформаціями зсуву в поверхневому шарі, величина яких залежить від величини натягу при деформуванні, а також від величини коефіцієнту тертя між стінкою отвору та інструментом. Як показано в роботах Розенберга О.О., Посвятенка Е.К. та інших зі збільшенням деформацій зсуву зменшується величина залишкових нормальних напружень стиску в поверхневому шарі. Величина залишкових напружень стиску в поверхневому шарі визначає втомну міцність отворів після оброблення дорнуванням.

В роботі автором не досліджений вплив коефіцієнту тертя на розподіл напружено-деформованого стану в поверхневому шарі. При чисельному розрахунку процесу дорнування був прийнятий коефіцієнт тертя, який дорівнює 0,6 та відповідає сухому тертю сталі по алюмінію.

Варіювання умовами тертя для зменшення коефіцієнту тертя – це додатковий резерв підвищення втомної міцності та довговічності ЛА.

Керування умовами контактної взаємодії може бути реалізовано за рахунок збільшення введення змащування в зону контакту. Не менш

ефективним може бути використання додаткового ультразвукового навантаження інструменту в процесі виконання технологічної операції.

3. Розмірність величини питомої роботи деформування на графіках (наприклад рис.3.42 рис.3.43 рис.3.44 та інші – в дисертації, рис. 15 – в авторефераті) представлені в одиницях виміру [МПа], що вносить ускладнення сприймання такої фізичної величини так, як виникає плутанина з розмірністю напружень. Більш правильно розмірність питомої роботи позначати [Дж/м³];

4. В дисертації автором проведено та обґрунтовано ранжування процесів пластичної обробки (дорнування, бар'єрне обтиснення і розкочування), що може мати високу практичну значимість при проектуванні технологічних процесів. Закономірно, що розкочування має найменшу ефективність у зв'язку з малим рівнем (відсотком) пластичної деформації та глибиною деформованого металу до 30...50 мкм в силу геометричних співвідношень отвору та інструменту (по даним науково-технічних публікацій). Це забезпечує переміщення зони зародження втомної тріщини з поверхні отвору на деяку глибину (співрозмірну з глибиною деформованого металу), але не дає сильного підвищення границі втомної міцності, внаслідок малої зони залишкових напружень стиску.

В цьому плані перспективним для даного напрямку робіт можуть бути розглянуті гібридні процеси, наприклад, суміщене розкочування з бар'єрним обтисненням, тощо. Це може бути реалізовано в подальших роботах автора.

5. Висновки по розділу 4 дуже короткі, тому не в повній мірі відображають результати досліджень та рекомендації, що отримані в роботі на даному етапі.

6. По тексту дисертації є деякі неточності по оформленню дисертації і автореферату:

а) на рис. 2.36 а, рис. 2.37 а, рис. 2.38 а, рис. 2.45 та інших не наведена розмірність напруження;

б) питома енергія на графіках (рис. 2.41, рис. 2.44, рис. 2.47) наведена без розмірностей. На рис. 2.49 помилково для радіального натягу дається

розмірність [МПа];

в) в дисертації на графіках (приведених на рис. 2.33 та інших), як правило індекси при змінних σ , ϵ , W не читаються, тощо.

В цілому наведені зауваження не впливають на якість, наукову новизну та практичну значимість дисертації тому їх можна розглядати як побажання. Вони можуть бути використані у подальшій роботі для розвитку ефективних процесів пластичної обробки зони отворів в елементах конструкцій ЛА.

9. Ідентичність автореферату змісту дисертації.

Автореферат в достатній мірі відповідає змісту дисертації.

10. Загальний висновок по дисертації

В цілому, дисертаційна робота **Семенцова Віктора Федоровича «Конструктивно-технологічні методи забезпечення ресурсу планера літака в зонах функціональних отворів»** вирішує актуальну науково-практичну задачу, має суттєві наукові та прикладні результати, є завершеною науковою працею. Дисертація виконана у відповідності до вимог пп. 9,11 «Порядку, присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника» МОН України, що затверджений постановою КМУ № 567 від 24.07.2013р. Зміст дисертації відповідає формулі та напрямкам досліджень паспорта спеціальності.

Тому автор дисертації **Семенцов Віктор Федорович** заслуговує **присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук по спеціальності 05.07.02 – проектування, виробництво та випробування літальних апаратів.**

Офіційний опонент,
завідувач кафедри «Механіки пластичності
матеріалів і ресурсозберігаючих процесів»
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут»,
доктор технічних наук, професор,
Заслужений діяч науки і техніки України

 В.А. Тітов

Підпис д.т.н. Тітова В.А. засвідчую

Учений секретар НТУУ «КПІ»

 А.А. Мельниченко

