

Розробка методу прогнозування ресурсу конструктивних елементів крила літака на стадії зародження макротріщини з урахуванням кінетики накопичення розсіяних пошкоджень

Разработка метода прогнозирования ресурса конструктивных элементов крыла самолета на стадии зарождения макротрещины с учетом кинетики накопления рассеянных повреждений

Developing of the aircraft's wing construction elements lifetime prediction method during macrocracks initiation stage with kinetics of scattered damage accumulation

1. Номер державної реєстрації підтеми -0113U001855, НТУУ «КПІ» - 2669-ф.

2. Науковий керівник - член-кор. НАН України, проф. Бобир М.І., Бобырь Н.И., BobyrMykolaI.

3. Суть розробки, основні результати.

Основний результат роботи полягає у якісній та кількісній оцінці комплексного впливу експлуатаційних і конструкційно-технологічних факторів (геометричних розмірів та ступеня пластичного деформування матеріалу) на параметри циклічної міцності елементів силової конструкції літаків з функціональними отворами на стадії зародження макротріщини з урахуванням кінетики накопичення розсіяних пошкоджень.

Робочою гіпотезою, яка закладена в роботі, є можливість збільшення циклічної міцності елементів силової конструкції літаків з функціональними отворами в умовах циклічного навантаження за рахунок пластичного поверхневого зміцнення технологічного отвору, вдосконалення і обґрунтування технологічних параметрів дорнування отворів.

Одними з найсуттєвіших розробок, які закладені в основу роботи є:

- модель визначення залишкових напружень з урахуванням накопичення розсіяних пошкоджень;
- експериментальні дослідження впливу кінетики накопичення пошкоджень на основні характеристики конструкційних матеріалів;
- експериментальні дослідження залежності втомної міцності конструктивних елементів з функціональними отворами від впливу початкової технологічної пошкоджуваності;
- оцінка впливу залишкових та експлуатаційних напружень на міцність силових конструктивних елементів з отвором після дорнування;

Методи прогнозування та діагностики ресурсу експлуатації відповідальних високонавантажених елементів конструкцій літака базуватимуться на основних законах та фундаментальних положеннях теорії пружно-в'язко-пластичності при циклічному навантаженні, нелінійної механіки континуальної пошкоджуваності та математичної статистики.

Суттєве уточнення розрахункового ресурсу по параметру мало- та багатоциклової втоми веде до обґрунтованого зменшення матеріаломісткості відповідальних високонавантажених елементів конструкцій крила транспортного літака.

(рос.)

Основной результат работы заключается в качественной и количественной оценке комплексного воздействия эксплуатационных и конструкционно-технологических факторов (геометрических размеров и степени пластического деформирования материала) на параметры циклической прочности элементов силовой конструкции самолетов с функциональными отверстиями на стадии зарождения макротрещины с учетом кинетики накопления рассеянных повреждений.

Рабочей гипотезой, которая заложена в работе, есть возможность увеличения циклической прочности элементов силовой конструкции самолетов с функциональными отверстиями в условиях циклической нагрузки за счет пластического поверхностного упрочнения технологического отверстия, совершенствования и обоснования технологических параметров дорнования отверстий.

Одними из важнейших разработок, которые заложены в основу работы являются:

- модель определения остаточных напряжений с учетом накопления рассеянных повреждений;
- экспериментальные исследования влияния кинетики накопления повреждений на основные характеристики конструкционных материалов;
- экспериментальные исследования зависимости усталостной прочности конструктивных элементов с функциональными отверстиями от влияния начальной технологической повреждаемости;
- оценка влияния остаточных и эксплуатационных напряжений на прочность силовых конструктивных элементов с отверстием после дорнования;

Методы прогнозирования и диагностики ресурса эксплуатации ответственных высоконагруженных элементов конструкций самолета будут базироваться на основных законах и фундаментальных положениях теории упруго-вязко-пластичности при циклической нагрузке, нелинейной механики континуальной повреждаемости и математической статистики.

Существенное уточнение расчетного ресурса по параметру мало и многоциклового усталости ведет к обоснованному уменьшению материалоемкости ответственных высоконагруженных элементов конструкций крыла транспортного самолета.

(англ.)

The main result is a qualitative and quantitative assessment of the impact of complex operational and constructional and technological factors (geometric dimensions and the degree of plastic deformation of the material) on the parameters of the cyclic strength of elements of the power structure aircraft with functional openings in its infancy macrocracks taking into account the kinetics of accumulation of scattered damage.

Working hypothesis, which is incorporated in the work, there is a possibility of increasing the strength of the cyclical components of aircraft primary structure with functional openings under cyclic loads due to the plastic surface hardening process hole, improvement and validation of process parameters mandrelling holes.

One of the most important developments that form the basis of the work are:

- a model of determination of residual stresses in the light of scattered damage;
- experimental studies of the influence of the kinetics of damage accumulation on the main characteristics of structural materials;
- experimental studies depending on the fatigue strength of structural components with functional holes on the influence of the initial process of damage;
- assessment of the effect of residual stresses on the performance and durability of the power of constructive elements with hole after mandrelling;

Forecasting methods and diagnostics of operation of highly critical structural elements of the aircraft will be based on the fundamental laws and the fundamental provisions of the theory of elastic-visco-plasticity under cyclic loading, nonlinear continuum mechanics of damage and mathematical statistics.

Substantial refinement of the estimated resources of the parameter small cycle fatigue and leads to a reasonable reduction in material consumption of highly critical structural elements wing transport aircraft.

4. Порівняння зі світовими аналогами.

Результати відповідають світовому рівню. Основний результат роботи полягає в розробці нових фізичних рівнянь теорії циклічної пружно-в'язко-пластичності при складному технологічному та експлуатаційному термосиловому навантаженні; методів теоретико-експериментального розрахунку ресурсу експлуатації виробів нової техніки та визначення залишкового ресурсу відповідальних високонавантажених елементів конструкцій різного призначення машинобудівного комплексу на стадії їх експлуатації. Вирішення названої комплексної наукової проблеми на сьогодні є одним із пріоритетних та перспективних напрямів розвитку МТДТ в передових країнах світу.

Вперше розробляються нові моделі визначення залишкових напружень в конструктивних елементах з функціональними отворами з урахуванням кінетики

накопичення розсіяних пошкоджень при циклічних навантаженнях з метою надійної оцінки ресурсу експлуатації конструкцій і апаратів нової техніки, діагностики виробленого і прогнозу залишкового ресурсу в процесі експлуатації. Нові підходи оцінки виробленого ресурсу об'єктів в процесі експлуатації, які ґрунтуються на діагностиці стану конструкційних матеріалів та на основі математичного моделювання процесів деградації.

5. Економічна привабливість для просування на ринок

Застосування розроблених методик та обладнання для оцінки кінетики накопичення пошкоджень дозволить надійно прогнозувати ресурс відповідальних та високонавантажених конструктивних елементів крила транспортного літака з функціональними отворами.

В роботі розвинуті комплексні підходи до розв'язку проблеми оцінки виробленого ресурсу об'єктів в процесі експлуатації, стану матеріалу:

- підходи ґрунтуються на діагностиці стану конструкційного матеріалу вузлів і конструкцій фізичними методами контролю стану матеріалу;
- підходи ґрунтуються на дослідженні зміни діагностованих фізико механічних параметрів об'єктів в процесі експлуатації;
- підходи ґрунтуються на моделюванні процесів деградації матеріалу на базі сучасних методів механіки пошкоджуваного середовища, механіки руйнування в умовах експлуатації з врахуванням індивідуальних властивостей об'єктів.

6. Потенційні користувачі (галузі, міністерства, підприємства, організації).

Результати проекту плануються використати в інженерній практиці КБ підприємств та організації авіакосмічного комплексу України (ДП «Антонов», МКБ «Південне», ПАТ «Мотор-Січ», ЗМКБ «Прогрес» та ін.); автопрому України (АвтоКРАЗ, АвтоЗАЗ); Нафтогаз України («Київтрансгаз», НПО «Заря», МКБ «Луч» та ін.) , енергомашинобудуванні (Ладизинська тепла електростанція ПАТ «ДТЕК ЗАХІДЕНЕРГО») та Інституту механіки Отто-фон-Геріке університету Магдебурга (ФРН)

7. Стан готовності розробки.

Розроблено більш точний метод розрахунку експлуатаційного ресурсу роботи конструктивних відповідальних та високонавантажених елементів крила літака з алюмінієвого сплаву Д16ЧТ та інш. конструкцій з функціональними отворами з урахуванням кінетики накопичення пошкоджень на стадії їх проектування.

8. Існуючі результати впровадження.

Результати роботи впроваджені для оцінки ресурсу, діагностики виробленого і прогнозу залишкового ресурсу в процесі експлуатації корпусних деталей та роз'ємних з'єднань деталей з орієнтованих вуглепластиків літальних об'єктів на ДП « Антонов» та КБ «Південне», а також у вигляді практичних рекомендації для підвищення надійності і довговічності безаварійної експлуатації при проектуванні відповідальних елементів конструкції на цих підприємствах.

Основні положення роботи впроваджені в навчальних курсах спеціальності динаміки і міцності машин – “ Теорія пластичності та повзучості”, “Прогнозування ресурсу конструкцій”, «Теорія пошкоджуваності конструкційних матеріалів» та відповідних двох циклів лабораторних робіт.

За матеріалами роботи захищена кандидатська дисертація старшим викладачем кафедри ДММ та ОМ Лавренко Я. І. за темою “Динаміка та довговічність високошвидкісних прецезійних центрофуг”, підготовлені до захисту 2 кандидатські дисертації: асс. Ковалем В. В. за темою “Малоциклова втома конструктивних елементів з урахування пошкоджуваності” та асс. Бондарцем О. А. за темою “ Модель кінетики накопичення пошкоджень в конструкційних матеріалах”. Також підготовлена до захисту докторська дисертація доц.. Грабовським А. П. за темою “Модель кінетики руйнування конструкційних матеріалів на основі механіки пошкоджуваності”.

Результати роботи впроваджені при прогнозуванні ресурсу роботи роз'ємних з'єднань деталей з орієнтованих вуглепластиків на авіаційному виробничому об'єднанні "Антонов", при проектуванні і КБ "Південне" з врахуванням.

Результати роботи впроваджені для оцінки ресурсу, діагностики виробленого і прогнозу залишкового ресурсу в процесі експлуатації корпусних деталей та роз'ємних з'єднань деталей орієнтованих

9. Назва організації, телефон, E-mail

НТУУ "КПІ", Механіко-машинобудівний інститут, кафедра динаміки і міцності машин та опору матеріалів,
406-82-53, mmi@kpi.ua



Експериментальний комплекс Vi-02-112, який дозволяє реалізувати як статичне так і циклічне навантаження за різними траєкторіями та при різних швидкостях навантаження (деформування) має можливість фіксувати експериментальні дані з заданою частотою протягом всього часу проведення експерименту



Експериментальний стенд (на базі TIRATEST 2300) для визначення характеристик міцності при статичному та мало цикловому навантаженні на розтяг, стиск, згин конструкційних матеріалів

10. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання розробки

1. Strackeljan J., Bobyr M., Khalimon O. Anisotropic damage modelling in aluminum alloys 11. Magdeburger Maschinenbau-Tage. Effizienz, Präzision, Qualität. Proceedings, 25-26 September, Magdeburg, Germany. – 8 pages. 2013.
2. Бабенко А.Є., Лавренко Я.І., Штракельян Й. Дослідження руху лабораторної центрифуги як багато масової системи. // Вісник НТУУ "КПІ". Серія "Машинобудування". – 2013 – №68. – С.186-194.
3. Babenko.A., Lavrenko I., Strackeljan J. Prediction of laboratory centrifuge resource based on damage perceptions. 11. Magdeburger Maschinenbau-Tage. Effizienz, Präzision, Qualität, 25-26 September, Magdeburg, Germany. – 9 pages. 2013.

4. Yakhno B., Trubachev S. STRESS-STRAINE STATE OF THE CYLINDRICAL WALLED PERFORATED SHELLS // Вісник НТУУ "КПІ". Серія "Машинобудування". – 2013 – №67. – С.126-130.
5. Гладский М.Н., Тимошенко А.В., Коваль В.В. Влияние концентрации напряжений на циклическое деформирование стали 20 при растяжении и кручении // Вісник НТУУ "КПІ". Серія "Машинобудування". – 2013. – №67. – С.90-95.
6. Бобырь Н.И., Бабенко А.Е., Лавренко Я.И., Халимон А.П. Долговечность конструктивных элементов с учетом поврежденности // Проблемы прочности. – 2014. – №4 (430). – С.73-83.
7. Бабенко А.Е., Лавренко Я.И. Определение динамических характеристик лабораторной центрифуги с учетом ее конструктивных особенностей // Вісник СевНТУ. Машиноприладобудування та транспорт. – 2014. - Вип. 140. – С. 10-16.
8. Bobyr M., Khalimon O., Bondarets O. Phenomenological damage model for anisotropic structural materials. Journal of Mechanical Engineering NTUU "Kyiv Polytechnic Institute" – №67. – 2013. – P.P. 5-13
9. М.Бобир, А.Бабенко, Я.Лавренко, О.Халимон Визначення ресурсу роторів лабораторних центрифуг. // Науковий журнал Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2013. – №3. – С.28-36.
10. Трубачев С.І., Яхно Б.О. Влияние жесткости основания на деформирование упруго-пластической трехслойной пластины. // Материали за IX международна научна практична конференция "НАСТОЯЩИ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗВИТИЕ - 2013" 17-25 ЯНУАРИ 2013. София "БялГРАД-БГ" ООД. – 2013. – Том 28., С.46-53.
11. Яхно Б.О. Малоцикловая усталость болтового соединения с применением углепластиков. // Materialy IX MEZINARODNI VEDECKO-PRAKTICKA KONFERENCE "MODERNI VYMOZENOSTI VEDY - 2013" 27.01.2013-05.02.2013/ Praha Publishing House "Education and Science" s.r.o. - 2013. – Том 73. – С.84-91.
12. Яхно Б.О. Расчет дефектов сварных соединений с использованием ПК Abaqus // Инженерные системы – 2013: Труды Международного форума: Москва, 15-16 апреля 2013г. – С.132-135
13. Бобырь Н.И., Бабенко А.Е., Лавренко Я.И., Халимон А.П. Динамика и долговечность лабораторной центрифуги // Научно-теоретический и практический журнал Современный научный вестник. Серия Технические науки, Современные информационные технологии. – 2014. – №19 (215). – С.72-83.
14. Трубачев С.І., Яхно Б.О. Влияние жесткости основания на деформирование упруго-пластической пластины / В збірнику Материали за IX Международна научна-практична конференция "Настоящи исследования и развитие-2013". София, "БялГРАД-БГ" ООД. – 2013. – Том 28. – С.46-53.
15. Бабенко А.Е., Лавренко Я.И., Куренков Н.Н. Влияние статической и динамической неуравновешенности центрифуги с учетом гироскопического эффекта. Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 24-25 апр. 2014г./ М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П.О. Сухого. – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2014. – 509с. – С.66-69.
16. Бабенко А.Е., Лавренко Я.И. Динамика лабораторной центрифуги РІСО21 // Научно-практический журнал "Вестник ГГТУ имени П.О. Сухого", 2014 - ГГТУ им. П.О.Сухого, Беларусь - №2 (57)' 2014. – С.22-28.
17. Прохоренко Д.В., Яхно Б.О. Напряженно-деформированное состояние сварных швов сэндвич-панели при лазерной сварке. // Материали за 10-а международна научна практична конференция, "Настоящи исследования и развитие – 2014" - Том 27. Технологии. София. "Бял ГРАД – БГ" ООД - 72 стр. – С.19-23.
18. Бобырь Н.И., Бабенко А.Е., Лавренко Я.И., Халимон А.П. Динамика и долговечность лабораторной центрифуги. Современный научный вестник. Белгород, Россия. – 2014. – №19(215). – С.72-82.

19. Бабенко А.Є., Лавренко Я.І., Куренков М.М. Вплив статичного і динамічного дисбалансу на коливання валу центрифуги з врахуванням гіроскопічних ефектів. Вісник НТУУ "КПІ", Машинобудування. — К.: НТУУ "КПІ". — 2014. — Вып. №1 (70). — С. 36-42.
20. Jens Strackeljan, Andriy Babenko, Iaroslav Lavrenko Необхідні умови стійкості рухомих елементів ротора центрифуги// Вісник НТУУ "КПІ". Серія Машинобудування. — 2015. — Випуск 72. — С.18-23.
21. Б.О. Яхно Чисельне моделювання залишкових напружень і пошкоджуваність після дорнування технологічних отворів в авіаційному сплаві Д16ЧТ // Вісник НТУУ "КПІ". Серія Машинобудування. — 2015. — Випуск 73. — С.96-99.
22. Lavrenko I., Babenko A., Khalimon O. Dynamik und Festigkeit von hochpräzisen Zentrifugen. 12. Magdeburger Maschinenbau-Tage 30.09 bis 01.10.2015. - B5-2.
23. Коваль В.В. Малоцикловая усталость конструкционных материалов с учетом поврежденности. // Современный научный вестник. — 2015. — № 5 (252). — С. 63-72
24. Лавренко Я.И., Бабенко А.Е. Экспериментальное исследование спектра собственных частот центрифуги. Научно-теоретический и практический журнал // Современный научный вестник. Серия Технические науки, Современные информационные технологии. — 2015. — №11 (258). — С.71-79.
25. Фам Д.К., Тимошенко О.В., Коваль В.В. Кінетика накопичення пошкоджуваності для мостової сталі 15ХСНД при крученні/ Там же. — С.18-19.
26. Фам Д.К., Халімон О.П. Визначення пошкоджуваності алюмінієвого сплаву АМг2 через деградацію модуля пружності . с. 40-42.
27. Юраткін В.В., Тимошенко В.О., Коваль В.В. Застосування композитних матеріалів у будівництві . с. 34-35.
28. Бурлак К.П., Тимошенко О.В., Коваль В.В., Чайка В.Г. Вплив циклічних навантажень на характеристики пружності та міцності еластичних матеріалів для знімних зубних протезів . с.35-37.
29. Пітцик Т.Є., Тимошенко О.В., Коваль В.В. Вплив режиму навантаження при малоцикловій втоми на кінетику накопичення пошкоджень для матеріалу Д16ЧТ.
30. Бурлак К.П., Тимошенко О.В., Коваль В.В. Кінетика накопичення пошкоджень металічних матеріалів при крученні.
31. Цибенко А.Г., Тимошенко О.В., Коваль В.В. Метод оцінки пошкоджуваності елементів конструкцій при простому навантаженні.
32. Юраткін В.В., Бабак А.М. Моделювання склопластикової арматури при випробуванні на розтяг.
33. Фам Дик Куан, Халимон А.П. Эффективная диаграмма деформирования алюминиевого сплава АМг2.
34. Фам Дик Куан, Яхно Б.О. Чисельне моделювання процесу дорнування технологічних отворів авіаційних конструкцій.
35. Гайдук Д., Бабак А.М. Аналіз моделі Мазінга при повторно-змінних навантаженнях.
36. Остапенко А.С., Бондарець О.А. Кінетика накопичення розсіяних пошкоджень та деградація модулів пружності в конструкційних матеріалах при пружно-пластичному деформуванні.
37. Демидюк Т.П., Бабак А.М., Порівняння деформаційних кривих втоми в залежності від методу визначення параметрів рівняння Басквіна – Менсона – Коффіна.
38. Перекрест В.В., Бабак А.М. Вимір швидкості та прискорень пасажирського ліфта.
39. Петін С.Р., Бабак А.М. Випробування поворотного кулака для боліда формули студент КПІ.
40. Петін С.Р., Бабак А.М. Випробування демпфера для боліда формули студент КПІ.
41. Сук Д.О., Бабак А.М. Аналіз несучої здатності будівельних текстильних стрічок різних типів.
42. Фам Д.К., Халимон А.П., Бондарець А.А. Моделирование кинетики накопления повреждений в алюминиевом сплаве АМг2.

43. Царик Б.Р., Коваль В.В., Халімон О.П. Визначення механічних властивостей багатошарових композиційних матеріалів.
44. Потапенко П.Ю., Лавренко Я.И., Бабенко А.Е. Определение собственных частот центрифуги с учетом гироскопического эффекта в зависимости от размещения опор.
45. Баклицький С.Б., Яхно Б.О. Розрахунок дефектів зварних з'єднань з використанням програмного комплексу ABAQUS STUDENT EDITION.
46. Баклицький С.Б., Яхно Б.О., Тимошенко О.В. Вплив циклічного навантаження на пошкоджувальність конструкційного авіаційного сплаву Д16чТ.
47. Нагородна Г.П., Яхно Б.О. Вплив зони термічного впливу у зварному з'єднанні на розподіл залишкових напружень та деформацій.
48. Петін С.Р., Бабак А.М. Квазі-статичне випробування демпфера для боліда формули студент КПП.
49. Демидюк Т.П., Бабак А.М. Деформаційні криві малоциклової втоми для силових елементів літака з дорнованими отворами.
50. Бабенко А.Е., Лавренко Я.И. Экспериментальное определение спектра собственных частот центрифуги. – С.18-19. X международная научно-техническая конференция "Машиноведение - 2014", Гомель 23-24 Октября 2014 г.
51. Бабенко А.Е., Лавренко Я.И. Амплитудно-частотная характеристика центрифуги HERMLE Z306. – С.38-41. X Международная научно-практическая конференция "Дни науки – 2014" 27.03 – 05.04.2014р. г. Прага, Чехия.
52. Бабенко А.Е., Боронко О.А., Лавренко Я.И. Методика определения динамических характеристик центрифуги. – С.183-185. III Международная научно-практическая конференция "21 век: фундаментальная наука и технологии" 23-24 января 2014 г. Москва, Россия
53. Коваль В.В. Оцінка пошкоджувальності елементів конструкцій в умовах малоциклового навантаження. XV міжнародна науково-технічна конференція ПРОГРЕСИВНА ТЕХНІКА, ТЕХНОЛОГІЯ ТА ІНЖЕНЕРНА ОСВІТА", м. Київ, Україна, 23-27 червня 2014 року
54. Бабенко А.Е., Лавренко Я.И., Куренков Н.Н. Колебания центрифуги с учетом статического и динамического дисбаланса. XV міжнародна науково-технічна конференція"прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта", м. Київ, Україна, 23-27 червня 2014 року.
55. Бобир М.І., Тимошенко О.В., Яхно Б.О. Визначення рівня технологічної пошкоджувальності при дорнуванні отворів авіаційних конструкцій. XV Міжнародна науково-технічна конференція "ПРОГРЕСИВНА ТЕХНІКА, ТЕХНОЛОГІЯ ТА ІНЖЕНЕРНА ОСВІТА", м. Київ, Україна, 23-27 червня 2014 року.
56. Бобир М.І., Тимошенко О.В., Халімон О.П., Коваль В.В. Вплив попереднього напрацювання на механічні властивості та довговічність теплостійкої сталі 12х1мф. XV Міжнародна науково-технічна конференція"ПРОГРЕСИВНА ТЕХНІКА, ТЕХНОЛОГІЯ ТА ІНЖЕНЕРНА ОСВІТА", м. Київ, Україна, 23-27 червня 2014 року.
57. Бобир М.І., Коваль В.В. Метод прогнозування ресурсу елементів конструкцій / Тези доп. 12-го Міжнародного симпозиуму українських інженерів-механіків у Львові, м. Львів, 29-29 травня 2015 р.
58. Коваль В.В. Оценка долговечности элементов конструкций в условиях мало циклового нагружения с учетом поврежденности / Тези доп. X междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. П.О. Сухому) подобщ. ред. С.И. Тимошина; Білорусь, Гомель, 23.10.2014.