**Розроблення узагальненого методу прогнозування ресурсу експлуатації елементів конструкцій із композиційних матеріалів при складному малоцикловому навантаженні з врахуванням пошкоджуваності**

**Разработка обобщенного метода прогнозирования ресурса эксплуатации элементов конструкций из композиционных материалов при сложном малоциклового нагрузке с учетом повреждаемости**

**Development of the generalized lifetime prediction method for composite structural elements at complex low-cycle loading with damage**

1. **Номер державної реєстрації теми - 0112U002444, НТУУ «КПІ» - 2516-ф.**
2. **Науковий керівник -** д.т.н., проф. Бобир М.І.., Бобырь Н.И., Bobyr Mykola I.
3. **Суть розробки, основні результати.**

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.

Теоретично обґрунтована нова узагальнююча модель кінетики накопичення розсіяних пошкоджень в КМ для умов складного напруженого стану, метод та алгоритм і програмне забезпечення по прогнозуванню ресурсу експлуатації об'єктів і конструкцій із КМ різного призначення на стадії їх проектування та залишкового ресурсу на стадії їх експлуатації.

Важливі нові результати роботи :

- узагальнена феноменологічна модель пошкоджуваності анізотропних КМ для умов нестаціонарного мало- та багатоциклового експлуатаційного термосилового навантаження;
- обґрунтований енергетичний критерій руйнування на стадії зародження макротріщини для названих умов складного термосилового навантаження;
- комплексний розрахунково-експериментальний метод діагностики технічного стану та прогнозування ресурсу відповідальних елементів конструкцій (на основі сучасних методик неруйнівного контролю та узагальненого критерію руйнування), а також створення на його основі комп'ютеризованих систем діагностики;
- розв'язано технологічні та експлуатаційні контактні задачі теорії пружно-в'язко-пластичності з обґрунтуванням ефективності технології обробки та технології з'єднань конструктивних елементів виробів нової техніки з метою прогнозування надійного ресурсу експлуатації;
- конструкторсько-технологічні рекомендації по підвищенню міцності та довговічності конструкцій із КМ в зоні з'єднань.
- отримані методики визначення показників заліковування мікропошкоджень при програмних режимах пружнопластичного режимів навантаження для умов складного напруженого стану.

**(рос.)**

Основной результат работы состоит в разработке новых физических уравнений теории циклической упруго-вязко-пластичности при сложном технологическом и эксплуатационном термосиловом нагружении; методов теоретико-экспериментального расчета ресурса эксплуатации изделий новой техники и определения остаточного ресурса ответственных высоконагруженных элементов конструкций разного назначения машиностроительного комплекса на стадии их эксплуатации.

Теоретически обоснована новая обобщающая модель кинетики накопления рассеянных повреждений в КМ для условий сложного напряженного состояния, метод, алгоритм и программное обеспечение по прогнозированию ресурса эксплуатации объектов и

конструкций из КМ разного назначения на стадии их проектирования и остаточного ресурса на стадии их эксплуатации.

В результате выполнения научно-исследовательской работы получено:

- Впервые разработана и обоснована новая феноменологическая модель кинетики накопления повреждений в КМ для условий сложного малоциклового нагружения (деформирования), которая базируется на основных положениях механики твердого деформированного тела, термодинамике необратимых процессов, механике поврежденных сред, теории вероятности и математической статистики.
- Впервые разработан критерий разрушения анизотропного КМ энергетического типа (на стадии зарождения макротрещины) для условий сложного малоциклового нагружения.
- Впервые установлено, что в условиях повторно-переменного нагружения (деформирования) в КМ проходят процессы накопления и залечивания микроповреждений. Установлены соответствующие количественные и качественные параметры поврежденности, которые учитываются в кинетическом уравнении и критерии разрушения.
- Впервые получена и обоснована матрица дополнительного изменения объема и формы репрезентативного элемента КМ, которые вызваны накоплением рассеянных повреждений в условиях повторно-переменного сложного нагружения. Проведена трансформация матрицы изменения объема и формы при реверсном дефектообразовании в матрицу функции поврежденности.
- Обосновано впервые связь матрицы функции поврежденности с тензором деформации и напряжений. Установлено, что матрица функции поврежденности коррелирует с тензором функции поврежденности в условиях реверсного нагружения (деформирования).
- Впервые получены инвариантные величины, которые характеризуют параметры поврежденности в общем виде сложного напряженного состояния. Они основываются на двух механизмах разрушения: отрыв и срез.
- Впервые получены соотношения для определения коэффициентов залечивания в АМ для условий повторно-переменного нагружения. Установлено, что для мягких режимов малоциклового нагружения упомянутые коэффициенты выше в сравнении с такими же для жёстких режимов. Установлены их количественные характеристики для целого ряда КМ в зависимости от их основных физико-механических характеристик.
- Проведена модернизация испытательных стендов и усовершенствована методика беспрерывной диагностики кинетики рассеянного разрушения для разных траекторий программного малоциклового нагружения (деформирования) с учетом анизотропии основных физико-механических свойств КМ.
- Разработан метод, алгоритм и программное обеспечение (на базе МКЭ) по прогнозированию ресурса эксплуатации элементов конструкций из КМ по параметру малоцикловой усталости на стадии их проектирования и остаточного ресурса на стадии их эксплуатации.
- Решены важные в прикладном плане задачи по прогнозированию ресурса высоконагруженных элементов конструкций планера летательного аппарата и прецизионного сепаратора в циклической постановке (на базе $2 \cdot 10^5$ циклов). Сравнение расчетных результатов программной малоцикловой усталости с натурными экспериментами показало их удовлетворительное совпадение.

**(англ.)**

The main result of work consists in development new physical equations theory of cyclic elastic-viscos-plasticity at complex technological and operational thermo-power loading; methods of theoretic-experimental lifetime calculation new products and residual lifetime definition of the responsible high-loaded designs elements machine-building complex different function at a stage of their operation.

The new generalizing model of scattered damages accumulation kinetics in CM for complex stress state conditions, method, algorithm and the software on lifetime prediction of o objects and designs operation from CM at a stage of their design and a residual lifetime at a stage of their operation is theoretically proved.

As research work result, it received:

- For the first time the new phenomenological model of damage accumulation kinetics in CM for complex low cyclic loading (deformation) conditions which is based on solid mechanics, thermodynamics of irreversible processes, continuum damage mechanics, the theory of probability and mathematical statistics is developed and proved.
- For the first time the power type, rupture criterion for anisotropic CM (at a stage of macrocrack initiation) developed for complex low-cyclic loading conditions.
- For the first time it is established that in the conditions of repeated-variable loading (deformation) in CM pass processes of accumulation and "closure" of microdamages. The corresponding quantitative and qualitative damage parameters, which considered in the kinetic equation and rupture criterion, are established.
- For the first time the matrix of additional change of volume and form of the CM RVE, which caused by scattered damage, accumulation for repeated-variable complex loading conditions received and proved. Matrix of change volume and form transformation carried out at a reverse damage process to a matrix of damage function.
- Proved, for the first time, communication of damage function matrix with deformation and stress tensor. Established that the damage function matrix correlates with damage function tensor for reverse loading (deformation).
- For the first time received invariant values, which characterize damage parameters in a general view of a complex stress state. They based on two rupture mechanisms: tear and shear.
- For the first time received ratios for definition of "closure" factors in CM for repeated-variable loading conditions. Established that for stress controlled low-cyclic loading the mentioned factors are higher in comparison with it for strain controlled. Established their quantitative characteristics for a number of CM depending on their main physic-mechanical characteristics.
- Carried out modernization of test machines and improved the continuous diagnostics of scattered rupture kinetics technique for different trajectories of program low cyclic loading (deformation) taking into account anisotropy of the CM main physic-mechanical properties.
- Developed the method, algorithm and software (based on FEM) on lifetime prediction of designs elements from CM on parameter of low-cyclic fatigue at a stage of their design and a residual lifetime at a stage of their operation.
- Solved important tasks in the applied plan on lifetime prediction of the high-loaded designs elements of aircraft glider and a precision separator in cyclic statement (based on $2 \cdot 10^5$ cycles). Comparison of settlement results of program low-cyclic fatigue with natural experiments showed their satisfactory coincidence.

**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 розроблені: розсіяних - нові феноменологічні нелінійні моделі кінетики накопичення пошкоджень в конструкційних матеріалах при термосилових нестаціонарних 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 основані на діагностиці стану конструкційних матеріалів та на основі математичного моделювання процесів деградації фізико-механічних властивостей конструкційних матеріалів при експлуатації конструкцій і деталей обладнання.

**5. Економічна привабливість для просування на ринок**

Застосування розроблених методик та обладнання для оцінки кінетики накопичення пошкоджень дозволить надійно прогнозувати ресурс конструктивних вузлів об'єктів на стадії проектування, проводити оцінку виробленого і прогнозувати залишковий ресурс на стадії експлуатації, що неможливо без розробки адекватних математичних моделей домінуючих процесів розвитку пошкоджуваності для індивідуальних умов експлуатації – енергетичних установок, об'єктів аерокосмічного комплексу , нафтохімічного обладнання, обладнання атомної енергетики, апаратів військової техніки, хімічного машинобудування, що дозволяє уникнути екологічних катастроф і людських жертв при непрогнозованому виході їх з ладу агрегатів і деталей конструкцій.

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

- підходи основані на діагностиці стану конструкційного матеріалу вузлів і конструкцій фізичними методами контролю стану матеріалу;
- підходи основані на дослідженні зміни діагностичних фізико механічних параметрів об'єктів в процесі експлуатації;
- підходи основані 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 планується використати в інженерній практиці КБ підприємств та організаці 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 (Ладижинська теплова електростанція ПАТ «ДТЕК ЗАХІДЕНЕРГО») та Інституту механіки Отто-фон-Геріке університету Магдебурга (ФРН)

**7. Стан готовності розробки.**

Теоретично обґрунтована нова узагальнююча модель кінетики накопичення розсіяних пошкоджень в КМ для умов складного напруженого стану, метод та алгоритм і програмне забезпечення по прогнозуванню ресурсу експлуатації об'єктів і конструкцій із КМ різного призначення на стадії їх проектування та залишкового ресурсу на стадії їх експлуатації.

**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 авіаційному виробничому об'єднанні " Антонов" та КБ "Південне", а також в 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", "Основні теорії пошкоджень та в підготовці нових 12 лабораторних робіт з цих курсів. За матеріалами роботи захищена кандидатська дисертація старшим викладачем кафедри ДММ та ОМ Лавренко Я. І. за темою "Динаміка та довговічність високошвидкісних прецензійних 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

Підготовлено два нових лекційних курси: «Прогнозування ресурсу конструкцій» та «Теорія пошкоджуваності конструкційних матеріалів» та відповідних двох циклів лабораторних робіт.

**9. Назва організації, телефон, E-mail**

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

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

Експериментальний стенд (на базі TIRATEST 2150) для визначення характеристик міцності армуючих волокон

**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. – 8pages. 2013.
2. Bobyr M.I., Khalimon O.P., Bondarets’ O.A. Simulation of scattered damage accumulation kinetics in complex stress state // Strength of materials . – 2012. – №1 – P.30-38.

3. Грабовский А.П., Бондарец А.А. Деформационные модели кинетики повреждаемости конструкционных материалов при упругопластическом деформировании // Весник ГГТУ им. Сухого. – 2013. – №1. – С.26-33.
4. Babenko.A., Lavrenko Ia., Strackeljan J. Prediction of laboratory centrifuge resource based on damage perceptions. 11. Magdeburger Maschinenbau-Tage. Effizienz, Präzision, Qualität, 25-26 September, Magdeburg, Germany. – 9pages. 2013.
5. Н.И. Бобырь, А.Е. Бабенко, Я.И. Лавренко, А.П. Халимон. Долговечность конструктивных элементов центрифуг с учетом поврежденности. с. 73-83. «Проблемы прочности», №4, 2014.
6. 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.
7. Bobyr M., Khalimon O., Bondarets O. Phenomenological damage models of anisotropic structural materials. Journal of Mechanical Engineering NTUU “Kyiv Polytechnic Institute” – №67. – 2013. – P.P. 5-13
8. М.Бобир, А.Бабенко, Я.Лавренко, О.Халімон Визначення ресурсу роторів лабораторних центрифуг. // Науковий журнал Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2013. – №3. – С.28-36.
9. Бабенко А.Є., Лавренко Я.І. Оцінка міцності чашки лабораторної центрифуги та впливу конструктивно-технологічних факторів // Вісник НТУУ "КПІ". Серія "Машинобудування". – 2012. – №64. – С.255-263.
10. Грабовський А. П., Бабієнко І.І., Закономірності і механізми пошкодження конструкційних матеріалів при напрацюванні // Вісник НТУУ "КПІ". Серія "Машинобудування". – 2012. – Вип.64. – С.178-184.
11. Грабовський А.П., Бабієнко І.І. Міцністний аналіз конструкційних матеріалів з урахуванням пошкоджуваності при пружно-пластичному деформуванні // Международный сборник научных трудов Донецкого НТУУ "Прогрессивные технологий и системы машиностроения". – 2012. - Выпуск 1,2 (44). – С.66-73
12. Трубачев С.І., Яхно Б.О. Влияние жесткости основания на деформирование упруго-пластической трехслойной пластины. // Материали за IX международна научна практична конференция "НАСТОЯЩИ ИЗСЛЕДОВАНИЯ И РАЗВИТИЕ - 2013" 17-25 ЯНУАРИ 2013. София "БялГРАД-БГ" ООД. – 2013. – Том 28., С.46-53.
13. 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.
14. 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
15. 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 технологи. – 2014. – №19 (215). – С.72-83.
16. А.П. Грабовський, О.А. Бондарець «Заліковування мікропошкоджень в конструкційних матеріалах при реверсних режимах навантажень». Тези доповідей III Міжнародної науково- технічної конференції ТК-2014 «Прогресивні напрямки розвитку технологічних комплексів» - 28-30 травня 2014р. (Збірник наукових праць), м.Луцьк. С. 17-18.
17. А.П. Грабовський, О.А. Бондарець «Заліковування мікропошкоджень в конструкційних матеріалах при реверсних режимах навантажень». Науковий журнал Луцького Національного технічного університету «Технологічні комплекси» №1(9) 2014р. С. 160-166.