

В.О. ПОВГОРОДНИЙ, О.С. БАБНЯК

Державний університет «Київський авіаційний інститут», Україна

## НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ ТА ЯКІСТЬ ВИРОБІВ МАШИНОБУДУВАННЯ

У статті розглянуто види неруйнівного контролю, втомного руйнування, якості та ефективності методів неруйнівного контролю. Вказано, що найбільш повне виявлення дефектів забезпечується, як правило, при використанні декількох методів. Комплексні системи неруйнівного контролю, складаються з декількох фізичних методів, звичайно, використовують тоді, коли можливість виявити дефекти за допомогою окремих методів (тобто, тип, розміри, розташування) відрізняються, неоднакові. Ефективність прийнятих рішень при конструюванні різного промислового обладнання залежить від достовірності знань про теплофізичні процеси під час його експлуатації. В основу методів моделювання та ідентифікації процесів теплообміну можуть бути покладені розв'язання обернених задач теплопровідності (ОЗТ) та термодружності (ОЗТП). У ряді випадків визначення теплофізичних характеристик (ТФХ) матеріалу або параметрів теплообміну методом ОЗТ є практично єдиним способом отримання необхідної інформації про об'єкт, що досліджується. Основними принципами методичних рекомендацій з визначення економічної ефективності НК є підхід до визначення ефекту та формування єдиного методичного підходу до визначення ефективності НК як при виготовленні, так і при експлуатації. За допомогою НК можна одержати інформацію про окремі властивості продукції, тобто про окремі одиничні показники якості. Розвиток та широке розповсюдження методів НК зумовили розвиток прикладної кваліметрії та теорії обернених задач.

**Ключові слова:** якість, втомне руйнування, неруйнівний контроль, ефективність, економічний ефект, обернена задача

**Вступ.** Зрозуміти в повній мірі стан та перспективи розвитку неруйнівного контролю (НК) можливо лише ознайомившись з принципами розробки виробів, а також з неруйнівним контролем у забезпеченні високої якості виробів.

Прикладами можуть бути принципи розробки виробів, що прийняті в авіаційній та космічній техніці, а також в суднобудівництві, енергетиці тощо. До останнього часу розробка виробів, термін служби яких обмежувалась втомою матеріалів, проводилась за принципом безвідмовної роботи, згідно з яким деталь не має дефектів, а терміни її служби визначаються втомою, тобто процесом накопичення пошкоджень, коли при циклічних навантаженнях малі неоднорідності матеріалу приводять до поступового утворення мікротріщини. З часом ці мікротріщини зростають у розмірах та розширюються, поки не виникають макротріщини, котрі приводять до руйнування виробу. При такому принципі розробки вважається, що в даному виробі в період його терміну служби не повинні виникати втомні макротріщини. На практиці це означає, що виріб вважається непридатним, якщо утворилась тріщина деяких (великих) розмірів.

Наприклад, для деяких турбореактивних двигунів літаків критичним розміром є тріщина довжиною 0,79 мм. Якщо така тріщина існує, то відповідна деталь бракується. Цей критерій відомий під назвою «критерій виникнення

дефекту». Тому що при подальшій експлуатації втомна тріщина збільшується, що призводить до раптового руйнування.

**Втомне руйнування.** Щодо цього вище наведеного принципу. По-перше, потрібна випробувальна програма, що моделює експлуатаційний наробіток. Ця програма дозволила б визначити термін служби виробів та інтервали технічного огляду та профілактичного ремонту. Виконання цієї програми потребує часу та її результати можуть стати відомими тоді, коли неможливо внести необхідні зміни в конструкцію виробу. По-друге, якщо втомне руйнування виникає чи на етапі розробки, чи в процесі роботи виробу, коли ще діє розрахунковий термін експлуатації виробу. В цьому випадку можуть бути потрібні значні фінансові ресурси на демонтаж та збирання цієї конструкції. Така ситуація може виникнути в силу дії цілого ряду різних факторів, котрі неможливо врахувати на етапі розробки. Третій недолік є в неможливості виявити всі початкові тріщини – чи через те, що контроль не досить якісний чи через те, що не всі частини виробу доступні для контролю. Якщо виріб з непоміченими тріщинами поступає в експлуатацію, можуть виникнути ранні відмови з самими важкими наслідками. Тому, термін «безпечної роботи», що визначений таким чином, може бути зовсім невеликим.

Як правило, вироби неїдентичні за своєю мікроструктурою, тому процес виникнення втомних дефектів повинен бути описаний статистично. Будемо стверджувати, що всі вироби експлуатуються на протязі одного розрахункового терміну служби, що за допомогою програми випробувань вибраний таким чином, щоб не був завищений відсоток відмов (відмовою вважається виникнення дефекту, котрий можна виявити). Тоді термін служби великої кількості виробів, що могли проработити більш розрахункового часу, є скороченим.

Супутньою проблемою, що пов'язана з принципом «безпечної роботи», є збільшення витрат, що може відбуватися через удосконалення методів НК. Якщо відмовою вважати втомні дефекти та початкові дефекти, то при більш чутливих методах вимірювань буде відбраковано більша кількість виробів. Слід сказати, що при цьому ймовірність відмов не змінюється. Така проблема виникала в зв'язку з тим, що засоби неруйнівного контролю удосконалювалися та досягли сучасного рівня чутливості.

Ці та ряд інших аналогічних проблем неможливо розв'язати, якщо не має методики вимірювання дефекту та прогнозування працездатності виробів з дефектами відомих розмірів. Прогнози можливо давати, якщо застосовувати методи механіки руйнування. Якщо статичне розтягуюче навантаження прикладене по нормалі до площини тріщини, що розташована в пружному тілі великих розмірів, то з теорії пружності витікає, що при цьому виникає поле напружень у вершині тріщини.

Жоден з відомих матеріалів не може необмежено довго витримувати поле механічних та термічних (температурних) напружень та довкола вершини тріщини виникає пластична деформація. Відомо, що дослідним шляхом встановлено, що для багатьох матеріалів ступінь ризику поєднання тріщини та зовнішнього навантаження може характеризуватися коефіцієнтом інтенсивності напружень. Якщо величина цього коефіцієнту перевищує деяке критичне значення (тобто, параметр відомий як тріщиностійкість) відбувається катастрофічне руйнування.

В випадку втоми металів при циклічному навантаженні виробу з тріщиною виникає циклічна зміна напруження. Якщо максимальне значення коефіцієнту інтенсивності напружень перевищує показники тріщиностійкості, то на протязі декількох нових циклів відбудеться катастрофічне руйнування виробу. У всіх інших випадках тріщина буде розширяться зі швидкістю, що залежить від матеріалу, корозійних властивостей, оточуючого середовища (наприклад, кліматичних характеристик) та величини навантаження.

Маючи всі ці відомості, можливо розрахувати кількість циклів, за які ця тріщина збільшиться до критичного розміру, що викликає катастрофічне руйнування. Такі розрахунки використовують при визначенні терміну служби різних виробів, що підлягають циклічним навантаженням, тобто для труб високого тиску на атомних електростанціях, морських судах та крилах літаків. Для інших систем з іншими видами відмов пропонуються інші моделі розвитку руйнування, наприклад, коли велика роль пластичної деформації при навантаженнях, ніж у методах, що базуються на лінійній механіці руйнування.

Можливість прогнозувати швидкість зростання дозволяє ввести новий принцип розробки виробів, що дає більший розрахунковий термін служби, тобто, принцип, що розглянутий вище. Іноді його називають принципом відмовостійкості. Виріб, в якому є макродефект, експлуатується, якщо можна показати, що при механічних та температурних напруженнях, що виникають у зоні дефекту, цей дефект не збільшиться до критичного розміру за розрахунковий термін служби. Ключовий момент такого принципу складається в тому, що передбачаються надлишкові контури навантаження, так що при виникненні локальних відмов виріб в цілому не є пошкодженим та може бути замінений та відремонтований. Деталі, що мають невеликий дефект (той, що можливо легко виявити), продовжують експлуатуватися, якщо цей дефект залишиться без змін до чергового контролю деталі. Зараз цей принцип у різних модифікаціях використовується при створенні самих різних технічних систем.

Даний принцип вільний від ряду недоліків, що притаманні принципу безпечної роботи, чи «нульових дефектів». Однак, його економічні та інші позитивні риси (наприклад, підвищення робочих показників), неможливо реалізувати без достатнього рівня приладів НК. Також необхідно забезпечити всі дефекти, розмір яких перевищує критичний рівень. Крім того, НК не повинен виявляти досить багато дефектів з розмірами, що менш, ніж критичний рівень (власно говорячи при контролі не повинні відбраковуватись деталі з такими дефектами). В іншому випадку, фінансові витрати збільшуються при будь-якій помилковій вибравовці працездатних виробів. Таким чином, потрібен такий контроль, котрий разом з інформацією якісного характеру при наявності дефектів дозволяв кількісно визначати розміри дефектів.

Саме такий принцип знаходить практичну реалізацію при контролі якості турбореактивних двигунів. Замість того, щоб зняти такі вироби з експлуатації, коли вичерпано розрахунковий термін їх служби, проводиться контроль кожної з тих деталей, що можуть бути зруйновані (розрахунковим методом). Деталь буде повернуто до експлуатації, якщо дефекту не буде взагалі або виявиться, що розміри дефекту дуже не значні, щоб вплинути на її подальшу експлуатацію. Звісно, використовуючи такий принцип, робимо висновок про економічний ефект від впровадження саме цього принципу. Економічний ефект збільшується.

В наш час розробляються програми забезпечення надійності для ряду інших конструкцій та матеріалів. В атомній енергетиці проводяться науково-дослідні

та дослідно-конструкторські роботи, що спрямовані на об'єднання методів механіки руйнування та НК; кінцевою метою є збільшення критеріїв прийняття рішень про те, щоб призупинити чи, виходячи з результатів НК, роботу АЕС та поставити її на ремонт, або продовжити її експлуатацію, оскільки відомо, що виявлені при НК дефекти не можуть привести до аварії.

Конкретні обмеження НК залежать від етапу життєвого циклу виробу, на якому здійснюється контроль. Відносна цінність таких показників, як продуктивність НК, ступінь автоматизації, універсальність апаратури та можливість перевірки виробів складної форми, є різною на різних етапах життєвого циклу виробів, починаючи від контролю первинних металів та закінчуючи контролем виробів у процесі експлуатації.

**Якість та ефективність методів неруйнівного контролю.** На якість та ефективність методів НК впливають три фактори. По-перше, кваліфікація оператора, який працює з апаратурою. Існує ризик виникнення помилок, що пов'язаний з людським фактором. По-друге, в практиці НК важливу роль мають норми та стандарти. Це, насамперед, стосується тих галузей, де потрібне строге виконання мір безпеки, наприклад, у атомній енергетиці. Оскільки ці норми мають у більшості статус закону, розробники нової техніки повинні орієнтуватися на існуючі норми та передбачати пропозиції по зміні цих норм. Все це часто потребує багатьох років роботи, що може суттєво загальмувати впровадження нових методів НК. Втретє, особливо важкими в НК є питання впровадження нових засобів контролю. Вони пов'язані з технічним оснащенням та з метрологічним забезпеченням НК. Як і в інших галузях техніки тут необхідно починати з фундаментальних досліджень та закінчувати практичним впровадженням.

Розглянуті вище питання пов'язані в головному з проблемою пошуку, опису та визначення розмірів конкретних дефектів у матеріалі. Однак додатково бажано було б визначати нелокальні властивості матеріалу, від яких залежить його стійкість до руйнування. Для цього слід було визначати наявність та величину залишкових напружень, котрі виникли в матеріалі в результаті пластичної деформації чи обмеженого теплового розширення, оскільки такі напруження будуть складатися з основним (механічним) напруженням, збільшуючи чи зменшуючи його. При визначенні фізико-механічних властивостей матеріалу, від яких залежить стійкість до руйнування, та, відповідно, закон розподілу руйнівних напружень, важливу роль відіграють особливості мікроструктури, зерна, пористість, вкраплення чи мікротріщини, їх розміри та характер, вміст другої фази та морфологія, а також текстура. В ході виробництва виникає необхідність визначати додаткові параметри (наприклад, температура, в'язкість), як частину програми контролю технологічного процесу.

Слід відзначити прогрес у визначенні та кількісному описі тих головних властивостей матеріалу, що важливі при оцінці структурної доцільності елементів. Намічені також контури «мостів», котрі пов'язують разом нові можливості вимірювань та прогнозування дефектів через критерії гідний/негідний, що одержані на базі механіки руйнувань. Це дозволяє замінити принцип «нульових дефектів» більш реалістичним та економічно вигідним принципом, згідно з яким всі елементи мають ті чи інші дефекти, а відбувається руйнування чи ні, залежить від розміру дефекту, властивостей матеріалу, де існує дефект, а також від характеру механічного навантаження під час

експлуатації даного елемента, що приводить до зростання розмірів дефектів до тих пір, поки не відбудеться руйнування.

Найбільш повне виявлення дефектів забезпечується, як правило, при використанні декількох методів.

Комплексні системи НК, складаються з декількох фізичних методів, звичайно, використовують тоді, коли можливість виявити дефекти за допомогою окремих методів (тобто, тип, розміри, розташування) відрізняються, неоднакові. Вибір методик та об'ємів їх застосування залежить від типів та розмірів дефектів переважно в окремих видах продукції. Окремий розгляд дефектів дозволяє більш точно розрахувати ймовірність вірної чи помилкової оцінки, більш обгрунтовано вибрати оптимальне поєднання різних методів НК та одержати в процесі контролю додаткову інформацію про стабільність технологічного процесу виробництва. Так, в практиці НК відомі випадки, коли удосконалення технології різко змінює співвідношення дефектів різного типу (наприклад, зміна частки тріщин у загальній кількості дефектів від 45 % до 50 %), що потребує зміни поєднання різних типів методів НК.

Можна зробити наступний висновок, що треба вибирати поєднання методів НК, щоб використовуючи різні можливості управляти технологічним процесом виробництва на основі аналізу частки браку, що визначена кожним з методів. Робимо висновок, що комплексна система НК може нести не тільки приймальну, але й попереджувальну функції.

В багатьох випадках виявлення дефектів залежить від розподілу дефектів за розмірами, а при розділенні дефектів за типами слід враховувати їх виявлення методами НК, що застосовуються.

В роботі [1] одержані спільні вирази для оцінки ймовірнісних характеристик будь-якої системи виробництво-контроль, в якій використовується декілька методів НК в різних об'ємах. Їх можна застосовувати для розрахунку показників надійності, ефективності та інших показників якості системи та для розв'язку задач оптимізації за будь-якими критеріями.

На прикладі застосування ультразвукового та радіографічного контролю розглянуто розв'язок задачі оптимізації систем НК. В якості заданого рівня надійності (ймовірності безвідмовної роботи) прийнято 0,99. Для досягнення цього рівня призначаються методи НК. Такий рівень може бути досягнуто при використанні одного радіографічного методу в повному обсязі або при поєднанні ультразвукового (100%) та радіографічного (20%) контролю. Згідно з наведеною методикою оцінки витрат на комплексний НК слід віддати перевагу другому варіанту, який більш задовольняє задану надійність при мінімумі витрат на виробництво виробу.

В роботах [2,3,12] наведена оцінка ефективності використання поєднання методів НК стосовно аналізу якості металопродукції при більш повному урахування характеру вихідних та інших дефектів різними методами НК, що дозволяє зробити наступні висновки:

- серед систем, що використовують три методи НК, мінімальні матеріальні втрати у всьому діапазоні контролю та найменшу ймовірність пропуску дефектів забезпечує сукупність візуального, магнітного та ультразвукового контролю;

- серед систем, що використовують два методи НК, переважним є поєднання магнітного, ультразвукового та теплового контролю;

- серед поодиноких методів НК ультразвуковий контроль є найбільш ефективним.

Необхідність створення надійної перешкоди на шляху виробництва недоброякісної продукції ставить першочергову задачу підвищення економічної ефективності контролю якості та збільшення зацікавленості промислових підприємств у впровадженні нових методів та засобів НК.

Ефективність прийнятих рішень при конструюванні різного промислового обладнання залежить від достовірності знань про теплофізичні процеси під час його експлуатації. В основу методів моделювання та ідентифікації процесів теплообміну можуть бути покладені розв'язання обернених задач теплопровідності (ОЗТ) та термопружності (ОЗТП). У ряді випадків визначення теплофізичних характеристик (ТФХ) матеріалу або параметрів теплообміну методом ОЗТ є практично єдиним способом отримання необхідної інформації про об'єкт, що досліджується.

Принциповими перевагами методів НК в порівнянні з візуальним та неруйнівним методами НК є об'єктивність, достовірність, висока продуктивність, покращення умов праці шляхом автоматизації процесів контролю, вплив на ефективність використання виробничих ресурсів та експлуатаційних витрат. В той же час, незважаючи на явні переваги методів НК, досвід промислових підприємств свідчить про значний відсоток руйнівних та візуальних випробувань та про незацікавленість деяких підприємств стосовно впровадження засобів та методів НК.

Специфічною особливістю використання НК є те, що головна частка економічного ефекту є не під час впровадженні сучасних методів НК, що супроводжується додатковими капітальними витратами підприємств-виробників, а в процесі експлуатації даної продукції, що зменшує зацікавленість цих підприємств у сучасних, але коштовних методах НК. Крім того, при суцільному НК у підприємств-виробників у перший часовий період їх застосування збільшується відсоток виявленого браку. В той час, коректувальна дія НК, що забезпечить з'ясування причин браку та удосконалення технологічного процесу, враховується не в повному обсязі.

Положення з недостатнім застосуванням сучасних методів НК посилюється відсутністю єдиного методичного підходу до розрахунку економічної ефективності НК. В багатьох існуючих методичних матеріалах значна увага приділяється технічним, а не економічним аспектам; незважаючи на те, що існує необхідність розрахунку економічного ефекту на всіх стадіях життєвого циклу продукції, що контролюється. Цей розрахунок ведеться тільки по прямим витратам; відсутній розрахунок ефективності на стадії науково-дослідної роботи (НДР) та промислової апробації.

Таким чином, основними принципами методичних рекомендацій з визначення економічної ефективності НК є підхід до визначення ефекту та формування єдиного методичного підходу до визначення ефективності НК як при виготовленні, так і при експлуатації, що забезпечує сумісність порівнюваних варіантів за допомогою коефіцієнту приведення до єдиного розрахункового року нормативного коефіцієнту економічної ефективності. Тобто, загальним критерієм ефективності НК є мінімум приведених витрат на виробництво та експлуатацію продукції, що виготовлена з застосуванням НК, при максимальному задоволенні конкретних потреб користувачів, що визначаються відповідністю якісних параметрів контролюємої продукції її функціональному призначенню.

**Економічний ефект формується виходячи з наступних складових:**

1. На стадії НДР та промислової апробації-вибір оптимальної технології контролю, що визначає підвищення продуктивності праці, рівня механізації та автоматизації; зменшення матеріальних та трудових витрат на стадії виробництва та експлуатації продукції;

2. На стадії виробництва-зменшення собівартості продукції за рахунок уникнення втрат на наступну механічну обробку своєчасно виявлених некондиційних матеріалів та виробів; ліквідація матеріальних та трудових витрат на виготовлення дослідних зразків; зменшення матеріалоємності виробів за рахунок можливого скорочення запасів міцності за результатами контролю; зменшення матеріальних та трудових витрат за рахунок своєчасної корекції режимів обробки за результатами НК; збільшення продуктивності основного обладнання за рахунок скорочення часу на контроль (НК можна проводити в робочих умовах), що еквівалентно додатковій віддачі від основних фондів; покращення умов праці; підвищення рівня механізації та автоматизації;

3. На стадії експлуатації – забезпечення необхідної надійності (безвідмовності, довговічності тощо) та, як наслідок, збільшення продуктивності праці та скорочення витрат від аварій та поломок; збільшення термінів експлуатації, що дозволяє одержати додаткову продукцію з тих самих виробничих потужностей; збільшення міжремонтних періодів та, як наслідок, скорочення збитків та простоїв на ремонт та обслуговування; відносна економія капіталовкладень; зменшення рівня аварійності та безпеки праці; об'єктивність контролю. При вибірковому руйнівному контролі, якщо частка дефектних виробів не перевищує норму, партія виробів визнається придатною, але в той час кількість некондиційних виробів може бути значним.

В процесі формування методики контролю якості враховано вплив часткових показників на величину економічного ефекту (коефіцієнти перебраковування, недобраковки, ступінь завантаженості засобів НК, покращення умов праці, коректуюча дія активного контролю, підвищення продуктивності основного обладнання).

Посилення вимог до якості та пов'язане з цим збільшення витрат на впровадження методів НК повинні компенсуватися скороченням експлуатаційних витрат. Але діюча система ціноутворення не в повній мірі компенсує додаткові витрати виробництва та зацікавлює підприємства у впровадженні нових методів контролю якості (принцип Парето, діаграма Ісіакави тощо).

Крім того, для цілеспрямованої дії на якість продукції при розробці нових виробів, при сертифікації продукції, що виробляється, визначення її конкурентоздатності, при вдосконаленні ціноутворення, визначення рівня автоматизації роботи промислових підприємств чи окремих виробництв та в багатьох інших випадках необхідна достатньо кількісна оцінка якості продукції, причому ця оцінка повинна бути комплексною. За допомогою НК можна одержати інформацію про окремі властивості продукції, тобто про окремі одиничні показники якості. Розвиток та широке розповсюдження методів НК зумовили розвиток прикладної кваліметрії та теорії обернених задач.

В сучасних умовах виробництва та експлуатації складних авіаційних, енергетичних машинобудівних конструкцій та окремих машин та механізмів засоби НК значною мірою спряють економії матеріальних ресурсів, підвищенню ефективності виробництва, збільшенню надійності техніки.

На сьогоднішній день обернені задачі, в яких причинні характеристики фізичних процесів визначаються за результатами вимірювань або за іншими наслідковими проявами, впевнено зайняли своє місце при дослідженні фізичних процесів різної природи, в тому числі і теплофізичних характеристик (ТФХ). Розв'язання внутрішніх обернених задач з ідентифікацією ТФХ матеріалів є важливим етапом при побудові математичних моделей теплових процесів у більшості матеріалів, що використовуються в сучасній аерокосмічній техніці, у металургійному виробництві та в різних галузях господарської діяльності.

Обернені задачі теплопровідності [3-11,13-16], відносяться до некоректних задач. Адамаром були введені умови коректності для операторного рівняння, що встановлює причинно-наслідковий зв'язок між характеристиками досліджуваної системи та її станом. У загальних рисах коректність по Адамару складається з того, що розв'язок існує, він єдиний, а також неперервно залежить від вихідних даних, тобто розв'язок стійкий.

**Висновки.** Головним недоліком всіх руйнівних методів є те, що дозволяючи з тією чи іншою (нехай навіть великою) похибкою оцінити величину напруження, вони не дають можливості визначити характер деформацій що викликані напруженнями, що фактично існують в матеріалі, тобто визначити стан матеріалу (крихке чи пластичне) і оцінити на скільки близьке воно до критичних станів матеріалу (плинності чи руйнуванню). Причина в обмежених інформативних можливостях методу, які традиційно використовують для вимірів не більше чотирьох незалежних інформативних параметра фізичних полів, що використовуються для діагностики.

Крім того слід зазначити, що відмічаючи найвищий рівень розвитку сучасних неруйнівних методів та засобів діагностики матеріалів та конструкцій доводиться констатувати не тільки відсутність засобів достовірного визначення характеристик НДС матеріалів в конструкціях об'єктів що експлуатуються, але і неможливість оцінки самої достовірності отриманих результатів. Тобто не існує достатньо переконливого експертного методу оцінки правильності визначення характеристик НДС фізичними методами, що є неруйнівними.

На теперішній час засоби контролю температури на неприступних для прямого термометрування поверхнях матеріалів, засновані на розв'язку прямих та обернених задач теплопровідності та термопружності.

Ретельний аналіз результатів проведеного багатофакторного експерименту дозволяє констатувати, що запропонований підхід дозволяє, не доводячи об'єкт дослідження до руйнування, визначити навантаження, при якому він буде зруйнований.

Економічна доцільність цього методу полягає в тому, що його застосування здешевлює складні експериментальні дослідження з пошуку точки, в якій може відбуватися руйнування при максимальному температурному напруженні в конструкції. Використання обернених задач термопружності та теплопровідності є інноваційним вирішенням для досягнення максимальної економічної ефективності дослідження цілісності конструкцій, що буде більше розкрито в наступних працях авторів.

### Список літератури

1. Білокур І.П., Охрімчук Л.Н., Христюк І.М. Застосування неруйнівного контролю в розв'язку задач оцінки якості продукції. -К., 2015, 360 с.

2. Краснекер А.С., Перельштейн Л.П., Завліна В.П. Про застосування поєднань методів неруйнівного контролю. -Дефектоскопія., 2016, №7.-С.77-82.
3. Мацевитий Ю. М. Обернені задачі теплопровідності: в 2-х т. Т. 1: Методологія. Київ: Наук. думка, 2002, 408 стор.
4. Бек Дж., Блакуел Б., Сент-Клер Ч. (мол.) Некоректні зворотні задачі теплопровідності. М.: Мир, 1989, 312 с.
5. Мацевитий Ю. М., Костіков А. О. Геометричні обернені задачі теплообміну. Київ: Наукова думка, 2013, 292 с.
8. Мацевитий Ю. М., Костіков А. О., Сафонов М. О., Ганчін В. В. До розв'язку нестационарних нелінійних граничних обернених задач теплопровідності. Проблеми машинобудування. 2017. Т. 20, № 4. С. 15–23.
9. Мацевитий Ю. М., Ганчін В. В. Розв'язування оберненої задачі ідентифікації тензора теплопровідності в анізотропних матеріалах. Проблеми машинобудування. 2021. Т. 24, № 3. С. 6–13.
10. Мацевитий Ю. М., Ганчін В. В. До розв'язування геометричних обернених задач теплопровідності. Проблеми машинобудування. 2021. Т. 24, № 1. С. 6–12.
11. Мацевитий Ю. М., Ганчін В. В. Багатопараметрична ідентифікація теплофізичних характеристик шляхом розв'язування внутрішньої оберненої задачі теплопровідності. Проблеми машинобудування. 2020. Т. 23, № 2. С. 14–20.
12. Adfmcak M. Kvalimetria ako prostriedok hre zabezpecenie objectivity privzajomnom porovnavani akosti vyrobkov. Ceska standardizace.- № 9. P. 330-333.
13. Alifanov O.M. Inverse heat transfer problems / O.M. Alifanov. – Berlin: Springer, 1994. - 348 p.
14. Maciag, A.; Grysa, K. Trefftz Method of Solving a 1D Coupled Thermoelasticity Problem for One- and Two-Layered Media. Energies 2021, 14, 3637. <https://doi.org/10.3390/en14123637>
15. Yu. M. Matsevityi, E. A. Strel'nikova, V. O. Povhorodnii, N. A. Safonov, V. V. Ganchin Methodology of Solving Inverse Heat Conduction and Thermoelasticity Problems for Identification of Thermal Processes Journal of Engineering Physics and Thermophysics, Translated from Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal, Vol. 94, No. 5, pp. 1134–1140, September–October, 2021.
16. Yu. M. Matsevityi, E. A. Strel'nikova, V. O. Povhorodnii, N. A. Safonov, V. V. Ganchin Toward the Solution of Inverse Thermal Conductivity and Thermal Elasticity Problems, Translated from Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal, Vol. 95, No. 2, pp. 381–386, March–April, 2022.

Стаття надійшла до редакції 05.10.2025 р.

**Повгородній Володимир Олегович** – кандидат техн. наук, доцент кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів. Державний університет «Київський авіаційний інститут», пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, E-mail: [povgorod@ukr.net](mailto:povgorod@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0002-0529-2466>.

**Бабняк Олександр Сергійович** – студент групи ПМ-101. Національний Державний університет «Київський авіаційний інститут», пр-т Любомира Гузара 1. М. Київ Україна, 03058, сервісний інженер ND Group Inc Проспект Академіка Корольова 1. Київ 03134, E-mail: [leryushoksahar@ukr.net](mailto:leryushoksahar@ukr.net)

---

V.O. POVHORODNII, O.S. BABNYAK

## NON-DESTRUCTIVE TESTING AND QUALITY OF ENGINEERING PRODUCTS QUALITY

The article considers the types of non-destructive testing, fatigue failure, quality and effectiveness of non-destructive testing methods. It is indicated that the most complete detection of defects is provided, as a rule, when using several methods. Complex systems of non-destructive testing, consisting of several physical methods, are usually used when the ability to detect defects using individual methods (i.e., type, size, location) is different, unequal. The effectiveness of decisions made when designing various industrial equipment depends on the reliability of knowledge about thermophysical processes during its operation. The methods of modeling and identification of heat transfer processes can be based on solutions of inverse problems of thermal conductivity (TC) and thermoelasticity (TCT). In some cases, determining the thermophysical characteristics (TPC) of a material or heat transfer parameters by the TCT method is practically the only way to obtain the necessary information about the object under study. The main principles of methodological recommendations for determining the economic efficiency of NC are the approach to determining the effect and the formation of a single methodological approach to determining the efficiency of NC both during manufacture and operation. With the help of NC, information can be obtained about individual product properties, that is, about individual unit quality indicators. The development and widespread use of NC methods led to the development of applied qualimetry and the theory of inverse problems.

**Keywords:** quality, fatigue failure, non-destructive testing, efficiency, economic effect, inverse problem

### References

1. Bilokur I.P., Okhrimchuk L.N., Khrystiuk I.M. Zastosuvannia neruivnogo kontroliu v rozviazku zadach otsinky yakosti produktsii. -K., 2015, 360 s.
2. Krasneker A.S., Perelshtein L.P., Zavlina V.P. Pro zastosuvannia poiednan metodiv neruivnogo kontroliu. -Defektoskopiia., 2016, №7.-S.77-82.
3. Matsevytyi Yu. M. Oberneni zadachi teploprovodnosti: v 2-kh t. T. 1: Metodolohiia. Kyiv: Nauk. dumka, 2002, 408 stor.
4. Bek Dzh., Blakuell B., Sent-Kler Ch. (mol.) Nekorektny zvorotniy zadachy teploprovodnosti. M.: Myr, 1989, 312 s.
5. Matsevytyi Yu. M., Kostikov A. O. Heometrychni oberneni zadachi teploobminu. Kyiv: Naukova dumka, 2013, 292 s.
8. Matsevytyi Yu. M., Kostikov A. O., Safonov M. O., Hanchin V. V. Do rozviazku nestatsionarnykh neliniinykh hranychnykh obernenykh zadach teploprovodnosti. Problemy manynobuduvannia. 2017. T. 20, № 4. S. 15–23.
9. Matsevytyi Yu. M., Hanchin V. V. Rozviazuvannia obernenoi zadachi identyfikatsii tenzora teploprovodnosti v anizotropnykh materialakh. Problemy mashynobuduvannia. 2021. T. 24, № 3. S. 6–13.
10. Matsevytyi Yu. M., Hanchin V. V. Do rozviazuvannia heometrychnykh obernenykh zadach teploprovodnosti. Problemy mashynobuduvannia. 2021. T. 24, № 1. S. 6–12.
11. Matsevytyi Yu. M., Hanchin V. V. Bahatoparmetrychna identyfikatsiia teplofizychnykh kharakterystyk shliakhom rozviazuvannia vnutrishnoi obernenoi zadachi teploprovodnosti. Problemy mashynobuduvannia. 2020. T. 23, № 2. S. 14–20

---

12. Adfmcak M. Kvalimetria ako prostriedok hre zabezpecenie objectivity privzajomnom porovnavani akosti vyrobkov. Ceska standardizaace.- № 9. P. 330-333.

13. Alifanov O.M. Inverse heat transfer problems / O.M. Alifanov. – Berlin: Spinger, 1994. - 348 p.

14. Maciag, A.; Grysa, K. Trefftz Method of Solving a 1D Coupled Thermoelasticity Problem for One- and Two-Layered Media. *Energies* 2021, 14, 3637. <https://doi.org/10.3390/en14123637>

15. Yu. M. Matsevityi, E. A. Strel'nikova, V. O. Povhorodnii, N. A. Safonov, V. V. Ganchin Methodology of Solving Inverse Heat Conduction and Thermoelasticity Problems for Identification of Thermal Processes *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, Translated from *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal*, Vol. 94, No. 5, pp. 1134–1140, September–October, 2021.

16. Yu. M. Matsevityi, E. A. Strel'nikova, V. O. Povhorodnii, N. A. Safonov, V. V. Ganchin Toward the Solution of Inverse Thermal Conductivity and Thermal Elasticity Problems , Translated from *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal*, Vol. 95, No. 2, pp. 381–386, March–April, 2022.

**Povgorodniy Volodymyr** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering State University “Kyiv Aviation Institute”, 1 Lyubomyr Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: povgorod@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-0529-2466>.

**Babnyak Oleksandr** – student of group PM-101. State University “Kyiv Aviation Institute”, 1 Lyubomyr Huzar Ave. Kyiv, Ukraine, 03058, Service Engineer ND Group Inc 1 Akademika Korolyova Ave. Kyiv 03134, E-mail: lelyushoksahar@ukr.net