

ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА

МАТЕРІАЛІВ І
КОНСТРУКЦІЙ

ДОВІДНИКОВИЙ ПОСІБНИК

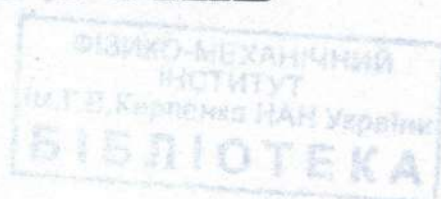
ТОМ 1

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ім. Г.В. КАРПЕНКА

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE
KARPENKO PHYSICO-MECHANICAL INSTITUTE



100 РОКІВ



ВІДВАННІСТВО «Простір-М»
2018

ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА МАТЕРІАЛІВ І КОНСТРУКЦІЙ

ДОВІДНИКОВИЙ ПОСІБНИК
у 8-ми томах

За загальної редакції
академіка НАН України
З.Т. НАЗАРЧУКА

ЛЬВІВ
ВИДАВНИЦТВО «Простір-М»
2016

5/11

620.3
Тер-38

Є.І. КРИЖАНІВСЬКИЙ, О.П. ОСТАШ,
Г.М. НИКИФОРЧИН, О.З. СТУДЕНТ,
П.В. ЯСНІЙ

ЕКСПЛУАТАЦІЙНА ДЕГРАДАЦІЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

За редакції
академіка НАН України
Є.І. КРИЖАНІВСЬКОГО

Том 1



ЛЬВІВ
ВИДАВНИЦТВО «Простір-М»
2016

TECHNICAL DIAGNOSTICS OF MATERIALS AND STRUCTURES

REFERENCE MANUAL

in 8 volumes

Editor-in-Chief
Academician of NAS Ukraine
Z.T. Nazarchuk



LVIV

PUBLISHING HOUSE «Prostir-M»

2016

Ye.I. KRYZHANIVSKYI, O.P. OSTASH,
H.M. NYKYFORCHYN, O.Z. STUDENT,
O.P. YASNII

OPERATIONAL DEGRADATION OF THE STRUCTURAL MATERIALS

Editor

Academician of NAS Ukraine

Ye.I. Kryzhanivskiy

Volume 1

LVIV

PUBLISHING HOUSE «Prostir-M»

2016

УДК 620.3

ББК 30.3

Тех 38

Розглянуто явище деградації конструкційних матеріалів, яке полягає у зміні їх структурно-фазового стану і накопиченні мікропошкодженості за тривалої дії температурно-силових експлуатаційних чинників та впливу робочого (технологічного) середовища, що зумовлює падіння їх фізико-механічних характеристик. Проаналізовано закономірності деградації алюмінієвих сплавів і сталей та їх зварних з'єднань різного призначення, механізми і стадійність цього процесу, його експериментальне моделювання в лабораторних умовах. Запропоновано методи оцінювання деградації матеріалів у різних елементах конструкцій руйнівними методами та її моніторингу неруйнівними методами за зміною структурно-чутливих фізичних характеристик матеріалів. Сформульовано умови переходу від стадії деградації матеріалів до стадії деградації елементів конструкцій та обґрунтовано необхідність урахування деградації матеріалів під час прогнозування роботоздатності елементів конструкцій за довготривалої експлуатації.

Для наукових працівників та інженерів, які працюють у галузі проектування і експлуатації авіаційного транспорту, нафто- і газогонів, теплової і атомної енергетики та інших галузей промисловості, а також для викладачів вищих навчальних закладів і аспірантів відповідних спеціальностей

Іл. 239. Табл. 80. Бібліогр.: 610 назв.

A phenomenon of structural materials degradation, that consists in the change of their structural and phase state and accumulation of damages under durable effect of temperature and force operation factors and under the effect of service (technological) environment that causes degradation of their physicomachanical characteristics is considered. Regularities of degradation of aluminium alloys and steels as well as their different-purpose joints, mechanisms and stages of this process, its experimental modeling in laboratory conditions are analyzed. The method of assessing materials degradation in different elements of constructions using fracture methods and its monitoring by non-destructive methods regarding the change of the structural-sensitive physical characteristics of materials are proposed. The conditions of the transition from the stage of materials degradation to the stage of degradation of the elements of structures are formulated and a necessity of considering materials degradation when predicting serviceability of structural elements under long-term operation is substantiated.

The reference book is intended for workers and engineers in the field of design and operation of rail and aviation transport, oil- and gas pipelines, thermal and nuclear power engineering and other fields of industry and also for lecturers of high schools and post-graduate students of corresponding specialities.

Fig. 239. Tabl. 80. Bibliogr.: 610 title.

Рецензенти: доктор технічних наук, професор *Харченко Є.В.*
доктор технічних наук, професор *Архипов О.Г.*

Друкується за постановою вченої ради Фізико-механічного інституту
ім. Г.В. Карпенка Національної академії наук України

ISBN 978-617-7501-02-1

ISBN 978-617-7501-03-8 (Т.1)

© Фізико-механічний інститут
ім. Г.В. Карпенка НАНУ, 2016

© Є.І. Крижанівський, О.П. Осташ,
Г.М. Никифорчин, О.З. Студент,
П.В. Ясній, 2016

© Видавництво "Простір-М", 2016

ВІД РЕДАКТОРА ВИДАННЯ

Проблема техногенної та екологічної безпеки є глобальною для сучасного розвитку людської цивілізації, тому розвинуті країни надають цьому першочергового значення. Важливою її частиною є діагностика матеріалів і розрахунків елементів інженерних конструкцій на міцність і довговічність, а також встановлення межі їх роботоздатності (прогнозування робочого ресурсу). Такі розрахунки сьогодні все частіше ґрунтуються на підходах фізико-хімічної механіки руйнування матеріалів і результатах неруйнівного контролю дефектності. В їх основі нова концепція втрати цілісності (руйнування) конструкції: руйнування є наслідком зародження і розвитку тріщин у матеріалі, підданому дії різних фізичних полів, а також фізико-хімічних чинників довкілля.

Різні недосконалості та дефекти можуть існувати в матеріалі від самого початку, виникати під час його обробки і монтажу конструкційних елементів, а також розвиватись під час служби конструкцій внаслідок дії навантажень та навколишнього середовища. Тому визначення реального стану дефектності досліджуваного об'єкта є неминучим етапом технічної діагностики, наукове завдання якої не лише виявити дефекти, але й видати рекомендації про їх небезпеку для нормального функціонування конструкційного елемента. Це означає, що сучасна технічна діагностика найважливіших виробів і потенційно небезпечних об'єктів охоплює техногенний моніторинг та стає все затребуванішим напрямком у галузі інформаційних технологій. Таким чином, внутрішня логіка розвитку фундаментальних досліджень, а також сучасні потреби інженерної практики сьогодні вимагають формування важливої наукової дисципліни – **діагностики матеріалів і конструкцій**.

Враховуючи, що окремі елементи такої дисципліни розділені у багатьох інших, а також зважаючи на появу ряду нових синтезуючих праць із діагностики матеріалів і конструкцій, назріла необхідність викласти її синтезоване бачення в рамках одного довідникового посібника. Авторський колектив цього видання, спеціально підготованого до столітнього ювілею Національної академії наук України, враховує, що згідно з Державним стандартом України 2389-94 «*Технічне діагностування та контроль технічного стану. Терміни і визначення*» під технічним діагностуванням розуміють визначення технічного стану об'єкта з означеною (заданою) точністю. Автори пропонованого довідникового посібника зосередили свою увагу на *наукових засадах* технічного діагностування – розглянули його фізичні основи, математичні моделі, апаратне та інформаційне забезпечення. Тобто, йдеться насамперед про галузь науки, яка вивчає вплив силових і температурних навантажень, фізико-хімічну дію середовища на пошкодження структури та зміну фізико-механічних властивостей матеріалів, несучу здатність конструкцій. Предме-

том цієї галузі науки є розроблення методів об'єктивного оцінювання поточного та граничного станів, розвитку руйнування матеріалів і конструкцій, а також створення необхідних діагностично-аналітичних приладів, систем та їх програмного забезпечення. Такий підхід підкреслює важливість врахування змін фізико-механічних властивостей самого конструкційного матеріалу та умов його експлуатації під час встановлення робочого ресурсу. Він від початку передбачає кінцеву мету виявлення дефектності – використання отриманих результатів як вихідних для подальшого застосування у механіці руйнування.

Під час укладання посібника автори заздалегідь відмовились від концепції *«безпечної роботи»*, яка передбачає, що від початку життєвого циклу вироб (чи елемент конструкції) є бездефектним, а термін його функціонування визначається накопиченням різноманітних пошкоджень (втомних, від повзучості, розсіяних в об'ємі матеріалу, особливо за дії водню, тощо), коли під час експлуатаційних навантажень останні призводять до поступового утворення мікротріщин. З часом мікротріщини розвиваються до макротріщин, які врешті спричиняють руйнування. Концепція *«безпечної роботи»* декларує, що під час експлуатації виробу не повинні утворюватись макротріщини (тобто, виріб вважатиметься непридатним, якщо виникла тріщина певних розмірів). Цю концепцію іноді застосовують і дотепер. Однак дослідженнями в галузі механіки руйнування встановлено, що процес руйнування матеріалу має свої докритичну і закритичну стадії. Це означає, що робота матеріалу в умовах регламентованого руйнування є допустимою, якщо приділяти належну увагу критичним параметрам дефектів, які характеризують його перехід у закритичну (некеровану) стадію. Таке трактування дає можливість перейти від концепції *«безпечної роботи»* до концепції *«безпечного пошкодження»*. Власне цієї парадигми дотримуються автори довідника. Допускаючи безпечні дефекти, вона не має низки недоліків, характерних для концепції *«безпечної роботи»*, і дає можливість знайти компроміс між необхідною якістю виробів (безпечністю конструкцій) та їх вартістю.

Економічні та інші переваги концепції *«безпечного пошкодження»* не можна реалізувати без суттєвого підвищення ролі неруйнівного контролю. Нова концепція вимагає більш інформаційно ємних і надійних методів контролю, які б гарантували кількісне визначення параметрів як самого матеріалу, так і його дефектів. До таких параметрів, з одного боку, відносяться фізико-механічні характеристики, залишкові та наведені напруження матеріалу, а з іншого – тип, форма, розміри, локалізація, орієнтація та кінетика розвитку дефектів.

Згадані вище засади обумовили структуру і зміст довідникового посібника.

У першому томі – **«Експлуатаційна деградація конструкційних матеріалів»** за редакції академіка НАН України Є.І. Крижанівського – проаналізовано зміну структурно-фазового стану і накопичення мікропошкоженості широкого класу конструкційних матеріалів за тривалої дії температурно-

силових факторів та впливу робочого середовища, що зумовлюють падіння їх фізико-механічних характеристик. Оцінено механізми і стадійність деградації, сформульовано умови її переходу від матеріалу до елементів конструкції, обґрунтовано необхідність урахування цього явища під час прогнозування роботоздатності інженерних об'єктів за довготривалої експлуатації.

Другий том видання – **«Математичне моделювання взаємодії фізичних полів із дефектами матеріалу»** за редакції академіка НАН України З.Т. Назарчука – присвячений формалізації взаємодії зондувального поля з макронеоднорідним середовищем, власне процесів, які складають фізичну основу тих методів неруйнівного контролю, що дають кількісну інформацію про дефекти конструкційного матеріалу і є найпридатнішими для подальшого застосування в механіці руйнування. Строгим з точки зору електродинаміки та методично єдиним з огляду математики підходом розглянуто монохроматичне електромагнітне опромінення у широкому (від квазістатистики до квазіоптики) частотному діапазоні. Використаний при цьому аналітико-числовий апарат розв'язання сингулярних функціональних рівнянь математичної фізики поширено на взаємодію акустичних і пружних хвиль із дефектами канонічної форми в кусково-однорідних середовищах. Описано дифракційні ефекти та властивості розсіяних полів, важливі для інтерпретації результатів неруйнівного контролю. На підставі теорії обернених задач розсіяння окремо розглянуто математичні основи побудови алгоритмів опрацювання даних вимірювань для неруйнівного виявлення дефектів. Запропоновано нові математичні моделі фото-, термо- та акустопружності, описано методи томографії скалярних і тензорних полів дефектів, проілюстровано застосування сучасних числових методів аналізу напружено-деформованого стану тіл із тріщинами.

У третьому томі – **«Моніторинг напруженого стану елементів конструкцій з використанням електромагнітних хвиль оптичного діапазону»** за редакції академіка НАН України Л.М. Лобанова – описано сучасні ефективні оптико-цифрові методи неруйнівного контролю. Зокрема, розглянуто фазозсувну лазерну інтерферометрію поверхні виробу стосовно потреб технічної діагностики, розвинуто нові методи електронної спекл-інтерферометрії, широкографії та цифрової кореляції зображень для визначення залишкових напружень в елементах конструкцій та оцінювання їх напружено-деформованого стану. Проаналізовано методи голографічної інтерферометрії для встановлення міцності конструкційних елементів і визначення окремих параметрів механіки руйнування. Детально описано методики та результати застосування інфрачервоних засобів моніторингу напруженого стану інженерних об'єктів.

Четвертий том – **«Електрофізичні методи неруйнівного контролю дефектності елементів конструкцій»** за редакції доктора технічних наук Р.М. Джали – присвячений аналізу фізичних основ, математичних моделей, засобів та інформаційного забезпечення електрофізичних методів неруйнівного контролю дефектності елементів конструкцій. Зокрема, на основі макроскопічних співвідношень термодинаміки нерівноважних процесів, механіки

деформівного твердого тіла та фізики поверхні запропоновано математичну модель електрофізичних процесів на межі металу зі середовищем, яка описує енергетичні та ємнісні характеристики міжфазних шарів, контактні різниці потенціалів за механічного напруження і електродної поляризації для контролю адгезії покриттів, дифузії, релаксації напружень, повзучості, корозійних властивостей та визначення стану поверхневих шарів металевих деталей. Розглянуто також теорію і засоби вихрострумowego контролю та структуроскопії, відповідні перетворювачі сигналів та апаратуру.

У п'ятому томі – «**Акустичні методи контролю деградації матеріалів і дефектності елементів конструкцій**» за редакції члена-кореспондента НАН України В.Р. Скальського – подано новий підхід до діагностики стану металу ультразвуковими методами, в рамках якого зворотно розсіяний випадковий ультразвуковий відгук, що формується в результаті взаємодії зондувального поля з його структурними елементами, запропоновано використати як інформаційний сигнал. На цій підставі створено технології ультразвукової комп'ютерної томографії, включаючи нові інструментальні засоби та діагностичні критерії, які дають можливість отримувати кількісні оцінки об'ємної пошкодженості металу. Висвітлено також теоретичні основи і методологію діагностування виробів і елементів конструкцій із використанням явища акустичної емісії. Зокрема, описано засоби дротової і телеметричної передачі інформації та їх застосування для оцінювання стану відповідальних промислових об'єктів. Значну увагу приділено вібродіагностиці та побудові розрахункових моделей і методик аналізу вібраційних характеристик роторів турбін із тріщинами. Проаналізовано досягнення в галузі практичної вібродіагностики. Подано дані про розвиток методів і створення апаратурних засобів вібраційного діагностування стану турбоагрегатів. Значну увагу приділено засобам вимірювання вібрацій, побудові та функціонуванню відповідних комп'ютеризованих систем.

Шостий том – «**Електрохімічні методи моніторингу деградації матеріалу конструкцій**» за редакції члена-кореспондента НАН України В.І. Похмурського – описує поняття, види та механізми загальної і локальної корозії, у тому числі корозійно-механічного руйнування, а також виділяє інформативні електрохімічні параметри, що характеризують інтенсивність корозійно-водневої деградації матеріалу. Тут розглянуто електрохімічні характеристики взаємодії корозивного середовища з металом: електродний потенціал, потенціал пітингоутворення, струм корозії, поляризаційний опір; описано сучасні, зокрема сканівні, методи електрохімічних (поляризаційних та імпедансних) випробувань. Детально розглянуто електрохімічні методи моніторингу, що пов'язані з кінетикою корозійно-механічного руйнування та, зокрема, його початкової стадії, з використанням таких інформативних параметрів, як електродний потенціал і струми поляризації та корозії. Значну увагу відведено електрохімічним методам пришвидшеного визначення характеристик корозійної втоми та корозійно-ерозійного руйнування конструкційних сталей зі застосуванням як інформативного параметра заряду, що йде на окиснення свіжodeформованої поверхні. Окремо виділено застосування електрохімічних методів

для оцінювання залишкового ресурсу металоконструкцій: показано використання електрохімічного імпульсного методу з такими інформативними параметрами, як кількість, частота та амплітуда імпульсів струму поляризації; описано технології електрохімічного моніторингу захисних властивостей органічних покриттів; проілюстровано імітаційне моделювання деградації та прогнозування ресурсу системи “метал–полімерний покриття” в умовах експлуатації.

У цьому тому – **«Інформаційні технології неруйнівного контролю»** за редакції доктора фізико-математичних наук І.М. Яворського – описано вібраційні сигнали з позиції теорії періодично нестационарних випадкових процесів та показано переваги такого підходу для раннього виявлення пошкоджень обертових систем. Проаналізовано інформаційні технології відбору та опрацювання низькоенергетичних імпульсних сигналів (потоків). Детально розглянуто сучасні спеціалізовані інформаційні технології опрацювання цифрових оптичних зображень та високопродуктивні підходи до тривимірної реконструкції зображень дефектів. Останні є особливо перспективними для створення автоматизованих систем аналізу рентгенівських знімків та фракталів поверхонь за лабораторного дослідження пошкоджених зразків.

Восьмий, останній том – **«Методи оцінювання залишкової міцності і довговічності елементів конструкцій за даними неруйнівного контролю»** за редакції члена-кореспондента НАН України О.Є. Андрейківа – дає аналіз методів для визначення міцності (залишкової і довготривалої), а також відповідного ресурсу елементів конструкцій за даними неруйнівного контролю. Сформульовано методи знаходження міцності (залишкової) за однократного навантаження, довготривалої міцності (залишкової довготривалої міцності) за довготривалого механічного (статичного і циклічного) навантаження і дії фізико-хімічних експлуатаційних чинників, ресурсу (залишкового) за довготривалого статичного і циклічного навантаження, а також дії фізико-механічних експлуатаційних факторів. Їх застосування продемонстровано на багатьох прикладах розрахунку елементів, відомих в інженерній практиці конструкцій довготривалої експлуатації.

Готуючи довідниковий посібник, автори свідомі, що приділили недостатньо уваги сучасним підходам ризик-аналізу, які поряд з економічними, екологічними та іншими чинниками сьогодні неодмінно беруться до уваги під час прийняття остаточного рішення про можливість й доцільність продовження робочого ресурсу відповідальних об'єктів. Цей аспект технічної діагностики перебуває зараз під посиленою увагою науковців і ще очікує узагальнення отриманих результатів.

Загалом пропоноване довідникове видання призначене для широкого кола спеціалістів – механіків, матеріалознавців, конструкторів, інженерів, що працюють у галузі технічної діагностики, прогнозування міцності і ресурсу елементів конструкцій, а також для студентів й аспірантів, які опановують спеціальність “матеріалознавство” (“діагностика матеріалів і конструкцій”).

З.Т. Назарчук

EDITOR'S REMARK

The problem of anthropogenic and environmental safety is global for the development of civilization therefore the developed countries pay primary attention to this problem. Diagnostics of materials as well as strength and durability calculation of the elements of engineering structures and also establishing of their serviceability limits (service life prediction) is an important part of this problem. Such calculations are based today more and more often on the approaches of physiochemical mechanics of materials and results of non-destructive testing of damages. These calculations use a new concept of the loss of structure integrity (fracture): fracture is a result of cracks initiation and propagation in the material subjected to the effect of different physical fields and physicochemical factors of environment.

Different imperfections and defects can exist in the material in the as-received state, appear during its treatment and structural elements mounting or can develop under operation of structures due to the effect of loading and environment. Therefore the determination of the real state of defectiveness of the investigated object is a necessary step of technical diagnostics, which scientific aim is to not only to detect defects but also to give recommendations on their danger for the safe functioning of a structural element. This means that modern technical diagnostics of the most important products and potentially dangerous objects includes anthropogenic monitoring and becomes a requested direction in the field of information technologies. Thus, intrinsic logic of fundamental investigations development and also problems of engineering progress require today the formation of the important scientific discipline – *diagnostic of materials and structures*.

Considering that separate elements of such discipline are distributed in many others and also considering the appearance of a number of new synthesized papers on materials and structures diagnostics, the need arose to present its synthesized vision within the frames of one handbook. According to the State Standard of Ukraine 2389-94 – “*Technical diagnostics and technical state control. Terms and definitions*” – technical diagnostics means the determination of the object technical state with a defined (given) accuracy. The authors of the proposed handbook have concentrated their attention on *the scientific bases* of technical diagnostics – they considered its physical grounds, mathematical models, tools and data ware. Here the branch of science that studies the influence of force and temperature loadings, physicochemical effect of the environment on structure damaging and change of the physical and mechanical properties of materials, carrying ability of structures, is meant first of all. The subject of this field of science is the development of the methods for objective appraisal of the current and boundary states, the development of the process of materials and structures fracture and also the creation of the diagnostic-analytical devices, systems and their software. Such an

approach emphasizes the importance of considering the changes in the physical and mechanical properties of structural material itself and the conditions of its exploitation when assessing its service life. From the very beginning it foresees the final aim of the defects identification, namely the use of the obtained results as initial ones for their further application in fracture mechanics.

When preparing the handbook the authors beforehand abandoned the concept of "*safe operation*" according to which a product (or a structural element) from the beginning of its life cycle was defectless and the time of its operation was determined by the accumulation of different damages (caused by fatigue, creep, disposed in the material bulk, especially under hydrogen effect etc.) when under service loading the last ones caused gradual micro-crack initiation. Micro-cracks are developing with time to macro-cracks that finally cause fracture. The concept of "*safe operation*" declares that in the process of the product exploitation the macro-cracks should not be formed (that is the product is considered to be unserviceable when a crack of a certain size has been formed). This concept is used sometimes today. However due to the modern fracture mechanics investigation it is established that the process of material fracture has its subcritical and overcritical stage. This means that the operation of the material in the conditions of controlled fracture is admissible if the critical parameters of defects that characterize its transition to the overcritical (non-regulated) stage are considered. Such explanation allows us to pass from the concept of "*safe operation*" to the concept of "*safe managing*". The authors of this handbook follow this paradigm. Assuming the presence of the safe defects this concept is free from many drawbacks that are typical for the concept of "*safe operation*" and allows us to find a compromise between the required quality of the products (safety of the structures) and their cost.

Economic and other advantages of the "*safe managing*" concept cannot be realized without significant improvement of the role of non-destructive evaluation. The new concept requires more informative and reliable test methods which would guarantee quantitative assessing of the material parameters as well as its defects. Such parameters include the physical and mechanical characteristics, the residual and induced stresses of material. Also they include the type, shape, dimensions, localization, orientation and kinetics of defect propagation.

The above presented ideas stipulated the structure and content of the presented handbook.

In the first volume of the handbook – "**Operational degradation of the structural materials**" (ed. academician NASU Ye.I. Kryzhanivskyi) – the change of the structural state and accumulation of micro-damage of a wide range of structural materials under long-term effect of temperature and force factors and under the influence of service environment that cause the decrease of their physical and mechanical characteristics. The mechanisms and stages of degradation process are analyzed, the conditions of its transition from the material to structural elements are formulated and the necessity of consideration of this phenomenon

when predicting serviceability of engineering objects under long-term operation is substantiated.

The second volume of the handbook – **“Mathematical modeling of the physical field interaction with material defects”** (ed. academician NASU Z.T. Nazarchuk) – is devoted to mathematical formalization of the probing field interaction with a macro-heterogeneous material. The mentioned interaction forms the physical base of such kinds of non-destructive evaluation that give quantitative information on the structural material defects and are the most suitable for further use in the fracture mechanics.

The monochromatic electromagnetic irradiation in a wide frequency range (from quasi-statics to quasi-optics) is considered rigorously in the sense of electrodynamics and methodically general from the viewpoint of mathematics. Used in this case the analytical-numerical approach for solving the singular functional equations is expanded for the study of acoustic and elastic waves interaction with cone-like defects in piece-wise environment. The diffraction effects and properties of the scattered fields which are important for interpretation of non-destructive test data are described. The fundamentals of the algorithms construction, based on the inverse scattering problems theory, are considered for processing the measuring data for non-destructive identification of defects. New mathematical models of photo-, thermo- and acoustic elasticity are proposed. The methods of scalar and tensor field tomography of defects are described and the use of modern numerical methods of the stress-strain state analysis of bodies with cracks is illustrated.

The third volume of the handbook – **“Monitoring of the stress state of structural elements using the electromagnetic radiation in optical wave range”** (ed. academician NASU L.M. Lobanov) – presents the description of modern optical-digital methods for non-destructive evaluation. In particular, a phase-shift interferometry of the product surface is considered regarding the purposes of technical diagnostics. Also new methods of electron speckle-interferometry, shearography and digital image correlation are considered for determining the residual stresses in the structural elements and evaluating their stress-strain state. The methods of holographic interferometry for establishing the strength of structural elements and determining some important for fracture mechanics parameters are analyzed. The procedures and results of using the infrared tools in monitoring the stress state of engineering objects are described in detail.

The forth volume of the handbook – **“Electrophysical methods of non-destructive testing of the structural elements defectiveness”** (ed. dr. sci. R.M. Dzhala) – is devoted to description of the physical bases, mathematical models, methods, means and data ware of non-destructive evaluation of the structural materials defectiveness. Particularly, some mathematical model of electrical processes at the metal-environment interface is proposed. This model is based on macroscopic correlations of non-equilibrium thermodynamics processes, deformed solid fracture mechanics, and surface physics. The model describes the energy and capacitance characteristics of the interface layers, contact differences in

potentials under mechanical stress and electrode polarization to control coatings adhesion, diffusion, stress relaxation, creep, corrosion properties and determination of the state of surface layer of metals. The theory and tools of the eddy-current testing, the corresponding signal transducers and equipment are also considered.

The fifth volume of the handbook – **“Acoustic test methods of materials degradation and structural elements defectiveness”** (ed. corresponding member NASU V.R. Skalskyi) – presents a new approach to diagnostics of the metal state by ultrasonic methods. It is supposed that the random inverse scattered ultrasound response, formed as a result of interaction of the sounding field and metal structural elements, to be used as an information signal. On this basis the technologies of ultrasonic computer tomography, including new tools and diagnostic criteria allowing us to obtain the quantitative estimation of the bulk metal damages, are created.

Also the theoretical bases and methodology of products and structural elements diagnostics using acoustic emission phenomenon is presented. In particular, the means of wire and telemetric transfer of information and their use for assessing the state of crucial industrial objects are described. Much attention in this volume is paid to vibration-based diagnostics and construction of calculation models and methods of the analysis of vibration characteristics of turbine rotors with cracks. Achievements in the field of practical vibration-based diagnostics are shown. Data on the development of the methods and tools for vibration-based diagnostics of the state of turbogenerators is presented. Great attention is also paid here to the vibration measuring means, design and operating of the corresponding computer systems.

The sixth volume of the handbook – **“Electrochemical methods of structural materials degradation monitoring”** (ed. corresponding member NASU V.I. Pokhmurskyi) – describes the ideas, types and mechanisms of general and local corrosion including corrosion-mechanical fracture. Also the informative electrochemical parameters that characterize the intensity of corrosion-hydrogen degradation of material are distinguished. Electrochemical characteristics of the interaction of corrosive environment and metal, namely electrode potential, pitting formation potential, corrosion current, polarization resistance are considered here. The modern polarization and impedance methods of electrochemical testing (scanning in particular) are described. Electrochemical methods of monitoring related with kinetics of their corrosion-mechanical fracture and establishing of its initial period, using such informative parameters as electrode potential and corrosion current, are considered in detail.

Much attention is paid here to the accelerated electrochemical methods of determining characteristics of corrosion fatigue and corrosion-erosion fracture of structural steels with application of the oxidation charge of the new-deformed surface, as an informative parameter. Separately the problems of application of electrochemical methods for assessing the residual life of metal structures are considered. The use of the electrochemical pulse method employing such informative parameters as quantity, frequency and pulse amplitudes of polarization

current is illustrated. The technologies of electrochemical monitoring of organic coatings protective properties are described and simulation of degradation and prediction of the life of the "metal-polymer coating" system in exploitation conditions is shown.

The seventh volume of the handbook – **"Information technologies of non-destructive testing"** (ed. prof. I.M. Yavorskyi) – gives, first of all, the description of vibration signals from the viewpoint of the theory of periodic non-stationary random processes and the advantages of such approach to early detection of rotating system damages is shown. The information technologies of extraction and working out low-energy pulse signals (flows) are described. Modern specialized information technologies for processing digital optical images and high-efficiency approaches to 3D reconstruction of the defect images are considered in detail. The last are very prospective in creation of the automated systems for analyzing X-ray photos and surface fractography in laboratory investigations of the damaged patterns.

The eighth, final volume of the handbook – **"Methods for assessing residual strength and structural elements life by the data on non-destructive testing"** (ed. corresponding member NASU O.Ye. Andreikiv) – presents the analysis of the methods used for evaluation of strength (residual and long-term ones) and also corresponding life of structural elements using the data of non-destructive testing. The methods of determining the residual strength under one-time loading, residual long-term strength under durable mechanic (static and cyclic) loading and the action of physicochemical exploitation factors, residual life time under long-term static and cyclic loading and also the action of the physical and mechanical exploitation factors are formulated. Their use is demonstrated on many examples of calculation of the elements of long-term exploitation structures known in engineering practice.

While preparing the handbook the authors are aware that not much attention has been paid here to the modern approaches of risk-analysis that alongside with economic, environmental and other factors are inevitably considered today in final decision making on the possibility and expediency of extension the service life of responsible structures. This aspect of technical diagnostics is being now under constant attention of the scientists and the generalization of the obtained results is expected.

In general the proposed handbook is intended for a wide range of specialists – mechanics, materials science researchers, designers, engineers who work in the field of technical diagnostics, prediction of strength and life of structural elements and also for students and post-graduate students specializing in *"diagnostics of materials and structures"* orientation of materials science.

Z.T. Nazarchuk

ВІД РЕДАКТОРА ТОМУ

Тривала, впродовж десятків років, експлуатація матеріалів часто зумовлює зміну їх структури та фізико-механічних характеристик, що необхідно брати до уваги, обґрунтовуючи роботоздатність конструкцій на стадіях їх проектування і експлуатації (наприклад, як в атомній енергетиці, де обов'язково враховують прогнозовані до кінця розрахункового терміну властивості металу). Звідси стабільність і моніторинг властивостей конструкційних матеріалів упродовж тривалої експлуатації важливі не менше, як і їх рівень у вихідному стані. Ця проблема особливо актуальна під час вирішення задач технічного діагностування стану конструкцій, довговічність яких близька до проектної чи її перевищує. Вона загострюється за дії на матеріал експлуатаційних середовищ, оскільки вони посилюють не тільки деградацію, але і чутливість металу до руйнування.

Структуру тому формують вісім органічно пов'язаних між собою розділів, в першому з них (автор *О.П. Остап*) розглянуто поняття експлуатаційної деградації матеріалів і конструкцій. Акцентовано на ролі експлуатаційних чинників (часу, температури, механічних напружень, технологічного середовища) в деградації конструкційних матеріалів порівняно з їх вихідним станом (постачання).

Розділ 2 (автор *О.П. Остап*) присвячено деградації алюмінієвих сплавів авіаційного призначення. Показано, що зміни в тонкій структурі цих сплавів під час тривалої експлуатації (20–40 років) визначають їх механічну поведінку і мікромеханізми руйнування. Встановлено різну чутливість механічних характеристик до деградації алюмінієвих сплавів для обшивки фюзеляжу і крил літаків і описано аномальну поведінку (проти вихідного стану) деградованих сплавів за низьких температур та дії корозивного середовища. Розглянуто експрес-метод деградації алюмінієвих сплавів у лабораторних умовах.

У розділі 3 (автори *Є.І. Крижанівський* і *Г.М. Никифорчин*) розглянуто деградацію сталей конструкцій транспортування та зберігання нафти і газу. Україна є транзитною державою, тому збереження у роботоздатному стані нашої трубопровідної транспортної мережі має велике значення. Висвітлено принципові аспекти проблеми: зміна структури сталей на нано- і мікрорівні та розвиток розсіяної в об'ємі металу пошкодженості. Під цим кутом описано механізм і стадії експлуатаційної деградації сталей, її закономірностей, при цьому виділено роль водню, утвореного внаслідок електрохімічної взаємодії корозивного середовища з металом та ним абсорбованого. Порівняльно оцінено чутливості різних механічних та корозійно-механічних властивостей до оцінювання деградації металу. Окремо висвітлено особливості експлуатаційної деградації металу зварних з'єднань, труб з ознаками водневого макророзшарування та великоємних резервуарів зберігання нафти.

Розділ 4 (автори *О.З. Студент, П.В. Ясній і О.П. Остап*) присвячено високотемпературній деградації сталей теплоенергетичного, нафтохімічного та металургійного устаткування: парогонів ТЕС, їх гинів та зварних з'єднань, відповідальних конструкційних елементів парових турбін (лопатка і диск), корпусу гідрокрекінгу нафти, а також роликів машин безперервного литва заготовок. Виокремлено роль пусків-зупинок технологічного процесу в експлуатаційній деградації теплотривких сталей та фрактографічні аспекти руйнування.

Автори *Г.М. Никифорчин і О.З. Студент* у розділі 5 аналізують наслідки деградації профільних металоконструкцій, експлуатованих за умов атмосферного впливу. Розглянуто металевий прокат елементів сіткових гіперболоїдних веж, експлуатований понад сто років, роль морської атмосфери в процесах його деградації та фрактографічні ознаки, пов'язані з деградацією старовинних сталей. Приділено увагу особливостям деградації металопрокату різного виду підіймально-транспортувальних механізмів (зокрема, для складування насипної сільськогосподарської продукції та вантажних морських портових конструкцій). Тут, особливу роль відведено тривалому циклічному навантаженню.

У розділі 6 (автор *П.В. Ясній*) розглянуто основні чинники, що впливають на експлуатаційну деградацію сталей і зварних швів корпусів атомних реакторів. Особливо підкреслено вплив вмісту домішок і окремих легувальних елементів на перебіг радіаційного окрихчення матеріалів корпусів реакторів на ділянці активної зони, а також подано основні формули для оцінювання радіаційного окрихчення матеріалів і зварних швів. Проаналізовано основні випадки експлуатаційного розтріскування елементів корпусів реакторів та колекторів парогенераторів АЕС.

У розділі 7 (автор *О.П. Остап*) показано, що зміна структурно-механічного стану деградованих матеріалів зумовлює можливість оцінювання їх ступеня деградації за кореляційними залежностями між параметрами мікроструктури, механічними і структурно-чутливими фізичними, фізико-хімічними та іншими характеристиками матеріалів. Наведено приклади, коли такі залежності для деградованих алюмінієвих сплавів і теплотривких сталей кардинально відрізняються від встановлених для вихідного стану (постачання) цих матеріалів.

Розділ 8 (автор *О.П. Остап*) присвячено визначенню критеріїв переходу від стадії деградації матеріалів до стадії деградації елементів конструкцій. Розглянуто питання їх експлуатації за принципом допустимої пошкодженості та акцентовано при цьому на необхідності врахування експлуатаційної деградації матеріалів під час прогнозування залишкового ресурсу елементів конструкцій.

Автори висловлюють подяку за співпрацю у поданих наукових дослідженнях та допомогу у підготовці рукопису цього тому довідникового посібника доктору технічних наук *П.О. Марущаку* та кандидатам технічних наук *Л.О. Бабіно, Ю. В. Головатюку, М.І. Греділь, Г.В. Кречковській та Р.В. Чепілю.*

С.І. Крижанівський

FROM VOLUME EDITOR

Long-term, during decades, exploitation of materials causes often a change of its structure and physical and mechanical characteristics as well what should be taken into consideration at a ground of workability of constructions at the stages of design and service (for example, in nuclear energy where predicted to the end of designed term the metal properties are required for taking into account). Therefore a stability and monitoring of properties of structural materials during its long-term service are important unless than its level in as-received state. This problem is especially actual at a solution of the tasks of technical diagnostics of a state of constructions, which lifetime is closer or exceeds design one. It becomes pointed at an action of exploited environments on material since they intensify not degradation only but also a sensitivity of metal to fracture.

Eight organically connected between itself chapters form a structure of the volume. In the first one (author *O.P. Ostash*) a concept of in-service degradation of materials and structures is considered. A role of the exploited factors (time, temperature, mechanical stresses, technological environment) is drawn in a degradation of structural materials in comparison with its as-received state.

Chapter 2 (author *O.P. Ostash*) is devoted a degradation of aluminium alloys of aircraft purpose. It is shown that a changes in fine structure of these alloys during long-term service (20...40 years) define its mechanical behaviour and micromechanism of fracture. The different sensitivity of the mechanical characteristics to degradation of aluminium alloys is established for fuselage skin and plane wing and abnormal behaviour (in comparison with as-received state) of degraded materials at low temperatures and an action of corrosion environment is described. The express-method for a degradation of aluminium alloys in-laboratory conditions is considered.

Degradation of steels of constructions for transportation and storage of oil and gas is considered in chapter 3 (authors *Ye.I. Kryzhanivskyi* and *H.M. Nykyforchyn*). Ukraine is transit country, therefore a saving of our pipeline transport network has important meaning. The principal aspects of the problem are lighted up: change of structure at nano- and microlevel and a development of dissipated of in-bulk material damaging. The mechanism and the stages of in-service degradation of steels, its peculiarities are drawn under this angle including a role of hydrogen, generated as a result of electrochemical interaction of corrosion environment with metal and its absorbed. The comparative evaluation of a sensitivity of the different mechanical and corrosion-mechanical properties concerning an assessment of metal degradation. The peculiarities of in-service degradation of weld joints metal, pipes with features of hydrogen macrolamination and big volume storage of oil are clarified separately.

Chapter 4 (authors *O.Z. Student*, *P.V. Yasniy* and *O.P. Ostash*) is devoted high temperature degradation of steels of power energy, refinery and metallurgical installation: steam pipeline of power stations, its bends and weld joints, responsible structural elements of steam turbines (blade and disc), oil hydrocracking shell, and роликів машин безперервного литва заготовок as well. The role of shut-downs in exploited degradation of heat resistant steels and fractography aspects of degradation are emphasized.

Authors *H.M. Nykyforchyn* and *O.Z. Student* analyse in chapter 5 the degradation consequences concerning profile metal constructions, exploited at the conditions of atmospheric influence. The rolled metal of the elements of lattice hyperboloid towers exploited above hundred years, the role of sea atmosphere in the degradation processes and the fractography features connected with degradation of age-old steels are considered. The degradation peculiarities of rolled metal of the different type lifting-transport mechanisms (namely, for storage poured agriculture products and cargo sea port constructions). Here, in the first turn, the especial role long-term cyclic loading is taken.

The main factors which effect on in-service degradation of steels and its welds of nuclear reactor shells are considered in the separate chapter 6 (author *P.V. Yasniy*). Influence of the impurities content and separate alloyed elements on the motion of radiation embrittlement of the reactor shell materials in active zone is especially distinguished and the basic formulas for an assessment of radiation embrittlement materials and its welds are presented. The main cases of exploited cracking of reactor shell elements and steam generator collector are analysed.

In chapter 7 (author *O.P. Ostash*) is shown that a change of structural-mechanical state exploited materials causes a possibility an assessment its degradation level on the base of correlation dependences between the parameters of microstructure, the mechanical and structural sensitive physical, physicochemical and other characteristics of materials. The examples are given when such dependences for degraded aluminium alloys and heat resistant steels are different cardinaly in comparison with the established ones for these materials in as-received state.

Chapter 8 (author *O.P. Ostash*) is devoted a determination of the criteria of transition from the stage of material degradation to the stage of degradation of structural elements. A matter its exploitation due the principle allowed damaging is considered and it is accented her on a necessity of a taking into account of in-service material degradation at a prediction of residual lifetime of structural elements.

Authors express thanks Ds. *P.O. Marushchak* and PhD *L.O. Babi*y, *Yu.V. Holovatyuk*, *M.I. Hredil*, *H.V. Krechkovska* and *R.V. Chepil* for the co-operation in the presented investigations and a help in a preparing of manuscript of this volume of engineering handbook.

Ye.I. Kryrzanivskyi

РОЗДІЛ 1

ЗАГАЛЬНІ ОСНОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ДЕГРАДАЦІЇ МАТЕРІАЛІВ

1.1. Поняття експлуатаційної деградації матеріалів і конструкцій

Створення конструкцій, споруд та машин передбачає три етапи їх життєвого циклу: проектування, виробництво та експлуатацію. На першому залежно від призначення розробляють конструкцію виробів та їх елементів, оцінюють їх навантаженість, робочі умови та, використовуючи довідники, вибирають конструкційні матеріали, які повинні забезпечувати роботоздатність, надійність і довговічність (заданий ресурс) цих виробів.

На етапі виробництва вибирають технологію виготовлення елементів конструкцій, яка забезпечує їх якісні показники, зокрема, наперед задані властивості конструкційних матеріалів та відсутність технологічних дефектів конструкції. Тут важливу роль відіграє технічна діагностика матеріалів і конструкцій. Її методи та засоби добре відомі [1, 2], коли контролюють якість напівфабрикатів і виробів після термообробки та інших технологічних операцій, а також виявляють технологічні дефекти у зварних, паяних, клеєних виробках з металічних і композиційних матеріалів, вибраковуючи їх з подальшого використання.

Під час експлуатації роль технічної діагностики сьогодні зводиться в основному до виявлення і моніторингу розвитку дефектів типу тріщин, зумовлених впливом експлуатаційних чинників, коли розміри цих дефектів значно (на порядок і більше) перевищує структурний параметр матеріалів (наприклад, розмір зерна). Тобто за своєю природою – це макродефекти, які визначають інтегральні властивості елементів конструкцій.

Проте ще задовго до появи таких дефектів під час експлуатації відбуваються зміни в конструкційних матеріалах на мікроструктурному рівні – т. зв. їх деградація. Але узагальнювальні результати досліджень цієї проблеми висвітлені ще недостатньо, проаналізовано лише окремі її аспекти [2–6], а сучасні нормативно-технічні документи, які регламентують особливості технічної діагностики матеріалів і конструкцій, не розглядають це питання. Технічні і граничні стани елементів конструкцій оцінюють за результатами дефектоскопічного контролю і характеристиками конструкційних матеріалів, отриманими на етапі виробництва, тобто без урахування їх експлуатаційної деградації. Це призводить до недостовірних оцінок залишкового ресурсу елементів конструкцій і зростання ризику їх руйнування.

Надійно оцінити цей ресурс можна тільки за характеристиками (міцністю, витривалістю, тріщиностійкістю тощо), що властиві конструкційним матеріалам у заданий момент часу їх служби. Тому необхідно знати поправкові коефіцієнти, які встановлюють, наскільки змінилися ці характеристики проти вихідних (у матеріалах у стані постачання).

Отже, оцінюючи технічний стан і залишковий ресурс об'єктів тривалої експлуатації, необхідно розрізняти поняття деградації конструкційних матеріалів чи елементів конструкції [7]. *Деградація конструкційного матеріалу* – це зміни під час тривалої експлуатації його структурно-фазового стану і накопичення мікроструктурної розсіяної пошкодженості (пор, мікротріщин тощо), що обумовлює зниження функціональних (службових) характеристик матеріалу.

Деградація елемента конструкції – це формування локальних макроскопічних корозійних (загальна і міжкристалітна корозія) та механічних і корозійно-механічних (макротріщини) дефектів, які зумовлюють падіння його несучої здатності. Оцінюють це явище методами і засобами дефектоскопії, тобто встановлюють місцезнаходження, кількість і розміри дефектів. Надалі деякі з них усувають під час ремонту, а інші враховують, визначаючи напружено-деформований стан елемента конструкції з тріщиною і його залишковий ресурс. Методи дефектоскопії при цьому аналогічні тим [1, 2], які застосовують на етапі виробництва елементів конструкцій. Хоча їх на сьогодні інтенсивно розвивають і вдосконалюють, що відображено у наступних томах посібника.

Експлуатаційну деградацію конструкційних матеріалів, яка залежить від технології їх виробництва і умов експлуатації (характеру механічних навантажень, природи експлуатаційного середовища тощо), оцінюють руйнівними і неруйнівними методами. Першими на основі випробувань т. зв. зразків-свідків чи зразків, вирізаних з тривало експлуатованих елементів конструкцій, визначають істинні ресурсні характеристики матеріалів і відповідні поправкові коефіцієнти для розрахунку залишкового ресурсу. Крім цього, на відповідних зламах зразків вивчають мікромеханізми руйнування, а фізичними методами мікроаналізу структурно-фазового стану встановлюють причини зміни механічних характеристик і механізму руйнування.

У багатьох випадках цей підхід застосувати проблематично, оскільки випробувальні зразки неможливо вирізати з діючого обладнання. Це можна здійснити тільки під час ремонту і заміни елемента конструкції. Практику зразків-свідків застосовують рідко (наприклад, в атомній енергетиці), при цьому за відсутності впливу експлуатаційного механічного чинника вони не дають змоги достовірно моделювати реальний стан матеріалів. Тому вживають неруйнівні методи діагностики стану матеріалів, зокрема металографію і стуктūrosкопію. Стуктūrosкопія – це оцінювання мікроструктурних і механічних параметрів матеріалів за вимірами їх структурно-чутливих фізичних і фізико-хімічних характеристик. Такий підхід здебільш якісний, а для кількісних оцінок необхідно встановлювати кореляційні залежності між цими пара-

метрами матеріалів. При цьому структуроскопія відіграє особливу роль для моніторингу деградації властивостей матеріалів у конструкціях тривалої експлуатації і встановленні періодичності їх контролю ще задовго до появи макродефектів, що дає змогу оцінити пошкодженість виробів на ранніх стадіях, тобто зменшує ризик їх руйнування.

Таким чином, діагностика матеріалів передбачає встановлення кореляційних залежностей між структурою, механічними характеристиками і розсіяною в об'ємі мікропошкодженістю матеріалів, з одного боку, та їх структурно-чутливими фізичними і фізико-хімічними властивостями – з іншого, а також розроблення засобів для виявлення цих зв'язків (*засобів структуроскопії* [2]).

Діагностика елементів конструкцій передбачає встановлення залежностей між параметрами фізичних полів у твердих тілах та формою, розміром і місцезнаходженням макродефектів в елементах конструкцій, а також розроблення засобів для виявлення цих зв'язків (*засобів дефектоскопії* [1, 2]) і прогнозування на цій основі залишкового ресурсу конструкцій з урахуванням експлуатаційної деградації конструкційних матеріалів.

1.2. Термодинаміка формування матеріалів під час їх виробництва

Властивості конструкційних матеріалів обумовлені їх хімічним (компонентним) і фазовим складом, а також морфологією структури (формою, розміром і розташуванням структурних елементів матриці і вторинних фаз). Структура матеріалів і їх фазовий склад формуються під час кристалізації з розплаву чи спікання методами порошкової металургії, а також термомеханічної обробки (вальцювання, кування, штампування тощо) при виготовленні напівфабрикатів і під час термічної обробки готових виробів. Закономірності цих процесів визначають діаграми стану металічних сплавів. У результаті властивості матеріалів залежать від структурно-механічних і фізико-хімічних параметрів металевої основи (матриці) та металургійних включень (сульфідів, фосфідів, оксидів тощо), а також вторинних фаз (інтерметалідів, карбідів, карбонітридів тощо), які утворюються під час цих процесів згідно з діаграмами стану. Ці діаграми будують за термодинамічними законами рівноважних систем [8], базуючись на правилі фаз Гіббса

$$c = f - k + 2, \quad (1.1)$$

де c – уількість ступенів свободи системи; f і k – кількість фаз і компонентів, а також на термодинамічному потенціалі (вільній енергії Гіббса)

$$G = U - TS + PV, \quad (1.2)$$

де U – внутрішня енергія системи; T – абсолютна температура; S – ентропія; P – тиск; V – об'єм. Під час побудови діаграм стану термодинамічний потенціал рівноважних систем повинен бути мінімальним. Для металів він є функцією температури, а для сплавів залежить не тільки від температури, а й від

концентрації їх компонентів. Оскільки в металургії сплавів зазвичай мають справу з рідкими і твердими фазами за постійного атмосферного тиску, тому в умовах термодинамічної рівноваги металічних сплавів мінімальною повинна бути вільна енергія Гельмгольца

$$F = U - TS, \quad (1.3)$$

а правило фаз має вигляд

$$c = f - k + 1. \quad (1.4)$$

З термодинаміки, а також практичного досвіду відомо, що будь-яка однофазна рівноважна система повинна бути гомогенною. Це відбувається внаслідок переміщення (дифузії) атомів кожного компонента із зон підвищеної концентрації в зони з нижчим їх вмістом, і цей процес також термоактивований. Тому на практиці металічні сплави отримують, регулюючи температуру нагріву та швидкість охолодження. Залежно від хімічного складу формують заданий фазовий склад і морфологію структури, які визначають фізичні, хімічні і механічні властивості сплавів.

1.3. Вплив експлуатаційних чинників на структуру і властивості конструкційних матеріалів

На відміну від стадії металургійного виробництва, під час експлуатації на метал діють додаткові чинники, які змінюють його термодинаміку, що призводить до нових закономірностей трансформації структури матеріалів проти їх вихідного стану (постачання). У першу чергу – це дія зовнішніх механічних навантажень і тривалий час експлуатації. Зокрема, механічні напруження і деформації змінюють вільну енергію сплавів, а також дифузійні процеси [9, 10]. Збільшення тривалості експлуатації (τ) згідно з відомим параметром Ларсона–Міллера [11, 12]

$$P = T(C + \lg \tau), \quad (1.5)$$

де C – константа матеріалу, аналогічне впливу підвищення температури (T), тобто також змінює термодинамічний потенціал Гіббса. Наприклад, тривала дія механічних напружень, яка активує дифузійні процеси, за температур 540...560°C зумовлює в сталях парогонів розпад перліту, що взагалі не передбачають діаграми стану теплотривких сталей.

На трансформацію вихідної структури металічних матеріалів впливають також інші експлуатаційні чинники – воденьвмісні середовища і радіаційне опромінення. Водень – практично постійний складник технологічних середовищ на етапах виробництва, оброблення та експлуатації конструкційних і функціональних матеріалів. На першому і другому його примусово видаляють з металу (вакуумування сталей, їх протифлокування обробка). Проте під час експлуатації, володіючи особливою атомно-молекулярною будовою і фізико-хімічними властивостями, водень взаємодіє з металами і обумовлює формування їх фазового складу, кінетику фазових перетворень і структуро-

утворення, особливості їх деформування і руйнування, зокрема, водневу крихкість [10, 13–17].

Бомбардування швидкими частинками в атомних реакторах також спричиняє суттєві зміни властивостей матеріалів [18]. З усіх видів цієї дії (нейтронне, α -, β - і γ -випромінювання) найсильніша за нейтронного опромінення. Конструкційні матеріали за впливу радіаційного середовища зазнають перетворень, які негативно проявляються у їх роботоздатності. Радіаційні пошкодження – це, у першу чергу, дефекти кристалічної ґратки з утворенням локальних об'ємів з високою концентрацією вакансій і підвищеною густиною міжвузлових атомів. За низькотемпературного опромінення (нижче температури рекристалізації) метал зміцнюється, проте втрачає пластичність і в'язкість, тобто стає схильним до крихкого руйнування. Високотемпературне опромінення стимулює дифузійні процеси, що сприяє розпаду пересичених твердих розчинів (старінню) [9]. Активізація дифузійних процесів зумовлює повзучість і зниження жароміцності матеріалів, а вакансійні пори сприяють помітному збільшенню їх об'єму – явище радіаційного розпухання [18].

Таким чином, окрема або сумісна дія таких експлуатаційних чинників, як підвищена температура, механічні напруження, час, воденьвмісне технологічне середовище, радіаційне опромінення може обумовлювати особливу термодинаміку процесів структуроутворення металів і сплавів. Зокрема, інтенсифікуються дифузія і перерозподіл легувальних елементів, змінюються закономірності фазових перетворень, зростає спотворення кристалічної ґратки, трансформується дислокаційна структура тощо. Це спричиняє зміну їх фізико-механічних властивостей, які вони мають у вихідному стані, у тому числі їх погіршення, тобто деградацію. Тому в останні десятиліття інтенсивно розвивається новий напрямок у матеріалознавстві – вивчення властивостей конструкційних матеріалів після довготривалої експлуатації, оскільки їх структура та фізичні і механічні характеристики, а також взаємозв'язок між ними суттєво відрізняються від встановлених у вихідному стані (постачання), зокрема, після термічного оброблення.

Нижче проаналізовано закономірності деградації алюмінієвих сплавів і сталей та їх зварних з'єднань різного призначення, механізми і стадійність цього процесу, його експериментальне моделювання в лабораторних умовах. Запропоновано методи оцінювання деградації матеріалів у різних елементах конструкцій руйнівними методами та її моніторингу неруйнівними за зміною структурно-чутливих фізичних характеристик матеріалів. Сформульовано умови переходу від стадії деградації матеріалів до стадії деградації елементів конструкцій та обґрунтовано необхідність урахування деградації матеріалів під час прогнозування роботоздатності елементів конструкцій за довготривалої експлуатації.

Література до розділу 1.

1. *Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. пос.* / Під заг. ред. В.В. Панасюка. Т. 5: Неруйнівний контроль та технічна діагностика / Під ред. З.Т. Назарчука. – Львів: ФМІ НАН України, 2001. – 1134 с.
2. *Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. пос.* / Під заг. ред. В.В. Панасюка. Т. 9: Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій / О.П. Остап, В.М. Федірко, В.М. Учанін та ін. – Львів: Сполом, 2007. – 1068 с.
3. *Мелехов Р.К., Похмурський В.І.* Конструкційні матеріали енергетичного обладнання. – К.: Наук. думка, 2003. – 384 с.
4. *Крижанівський Є.І., Никифорчин Г.М.* Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання: Наук.-техн. пос. у 3-х т. / Під заг. ред. В.В. Панасюка. – Івано-Франківськ; Львів: Вид-во Івано-Франківськ. нац. техн. ун-ту нафти і газу. Т. 1: Основи оцінювання деградації трубопроводів. – 2011. – 458 с.; Т. 2: Деградація нафтопроводів та резервуарів і її запобігання. – 2011. – 448 с.; Т. 3: Деградація газопроводів та її запобігання. – 2012. – 434 с.
5. *Марущак П.О., Панин С.В., Студент А.З., Овечкин Б.Б.* Масштабные уровни деформации и разрушения теплостойких сталей / Отв. ред. В.Ф. Пичугин. – Томск: Изд-во Нац. иссл. Томск. политехн. ун-та, 2013. – 236 с.
6. *Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. пос.* / Під заг. ред. В.В. Панасюка. Т. 15: Остап О.П. Структура матеріалів і втомна довговічність елементів конструкцій. – Львів: СПОЛОМ, 2015. – 312 с.
7. *Остап О.П., Андрейко І.М., Головатюк Ю.В.* Деградація матеріалів і втомна міцність тривало експлуатованих авіаконструкцій // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2006. – 42, № 4. – С. 5–16.
8. *Физическое металловедение* / Под ред. Р. Кана. – М.: Мир, 1968. – Вып. 2. – 490 с.
9. *Герцикен С.Д., Дехтяр И.Я.* Диффузия в металлах и сплавах в твердой фазе. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1960. – 564 с.
10. *Шановалов В.И.* Легирование водородом. – Днепропетровск: Журфонд, 2013. – 386 с.
11. *Larson F.R., Miller J.* A time-temperature relationship for rupture and creep stresses // Trans. ASME. – 1952. – 74, № 5. – P. 765–771.
12. *Должанский П.Р.* Особенности оценки остаточного ресурса паропроводных труб при эксплуатации сверх паркового ресурса // Теплоэнергетика. – 2005. – № 8. – С. 35–39.
13. *Гельд П.В., Рябов Р.А., Мохрачев Л.Г.* Водород и физические свойства металлов и сплавов. – М.: Наука, 1985. – 232 с.
14. *Колачев Б.А.* Водородная хрупкость металлов. – М.: Metallurgiya, 1985. – 218 с.
15. *Похмурський В.І., Федоров В.В.* Вплив водню на дифузійні процеси в металах. – Львів: ФМІ НАН України, 1998. – 208 с.
16. *Robertson I.M.* The effect of hydrogen on dislocation dynamics // Eng. Fract. Mech. – 2001. – 68. – P. 671 – 692.
17. *Андрейків О.Є., Гембара О.В.* Механіка руйнування та довговічність металевих матеріалів у водневомісних середовищах. – К.: Наук. думка, 2008. – 344 с.
18. *Структура и радиационная повреждаемость конструкционных сталей* / А.М. Паршин, И.М. Неклюдов, И.В. Горынин и др. – М.: Metallurgiya, 1996. – 476 с.

Технічна діагностика матеріалів і конструкцій [Текст] : довід. посіб. : у 8 т. / за заг. ред. акад. НАН України З.Т. Назарчука ; НАН України, Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка. - Львів : Простір-М, 2016. - ISBN 978-617-7501-02-1.

Т. 1 : Експлуатаційна деградація конструкційних матеріалів / Є. І. Крижанівський [та ін.] ; за ред. акад. НАН України Є. І. Крижанівського. - 2016. - 356 с.

1. РОЗДІЛ

ЗАГАЛЬНІ ОСНОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ДЕГРАДАЦІЇ МАТЕРІАЛІВ