

УДК 621.791.11:693

ГЕНЕЗИС РОЗВИТКУ ГІПОТЕЗ, ТЕОРІЙ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ МІЦНОСТІ ТА РУЙНУВАННЯ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ І КОНСТРУКЦІЙ

М.О. Терещук¹,

канд. техн. наук

В.Д. Макаренко¹,

д-р техн. наук, професор

В.І. Савенко¹,

д-р техн. наук (ФРН), професор

Т.А. Гончаренко¹,

д-р техн. наук, професор

М.І. Бондаренко²,

д-р філософії, канд. пед. наук, доцент

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ² Глухівський національний педагогічний університет імені Олександра Довженка, Глухів

DOI: 10.32347/2410-2547.2025.115.416-424

Вперше проведено історичний екскурс щодо розвитку гіпотез і теорій природи та механізмів руйнування крихких і пластичних матеріалів. Показано вклад у розвиток сучасної механіки деформованого тіла українських вчених-експериментаторів і теоретиків, які вивчали характеристики міцності багатьох матеріалів залежно від різних швидкостей деформування, температури, встановили наявність залишкових напружень та інших факторів. Зазначено, що подальший технічний прогрес неможливий без створення нових методів експериментальних досліджень механічних властивостей матеріалів.

Ключові слова: генезис, деформації, тріщини, пластичні зони, тріщиностійкість, властивості матеріалів, міцність, втомленість металу.

Вступ. Як відомо, при створенні будівельних споруд, тобто в повсякденній практиці, спеціалістам потрібні конструкції, машини, пристрої, які за мінімальних витрат мали б достатню працездатність тривалий період часу. Тому міцність будь-якого об'єкта інженери-експлуатаційники завжди мають тримати під контролем. Міцність – це загальне поняття, що визначає такі окремі характеристики, як надійність, довговічність, стійкість тощо. Гіпотези, теорії, моделі руйнування розрізняються залежно від властивостей матеріалу (пластичне і крихке), умов навантаження, видів основних джерел руйнування і т.д. З розвитком теоретичних засад та експериментального інструментарію безперервно удосконалюються як гіпотези, так і теорія механізмів руйнування матеріалів, яким присвячено дану працю.

Мета роботи полягає в дослідженні генезису з подальшим розвитком гіпотез та теорій руйнування будівельних матеріалів у процесі їхньої експлуатації.

Основні положення. Коротко розглянемо історичні відомості стосовно предмета досліджень. Припускають, що першим ученим, який експериментально вивчав міцність різних матеріалів і конструкцій був Леонардо да Вінчі. Він перевіряв міцність дроту на розтяг, випробував балки на міцність та жорсткість, на згин. Утім результати його робіт залишилися невідомими наступним поколінням і не змогли стати надбанням багатьох дослідників та інженерів.

У XVII ст. почала стрімко розвиватися математика, астрономія та інші природничі науки, в тому числі, опір матеріалів і механіка. Тоді ж вийшла у світ відома книга Г. Галілея «Бесіди» та відповідні математичні докази, що знаменувало виникнення науки про міцність – опору матеріалів. У цій праці Г. Галілей описав деякі дослідження стосовно впливу власної ваги на міцність і дійшов висновку, що зі збільшенням абсолютних розмірів конструкції міцність її зменшується та настає такий момент, коли вона руйнується під дією власної ваги. При цьому

він на основі експериментів встановив, що міцність прямо пропорційна площі поперечного перерізу. За результатами проведених дослідів міцності бруса на згин вчений зазначив: «Будь-яка лінійка або призма, ширина якої більша за товщину, має більший опір згину, коли вона поставлена на ребро, ніж тоді коли вона лежить плазом. При цьому даний опір у стільки разів більший, у скільки разів ширина перевищує товщину».

У 1678 р. вийшла книга Р. Гука: «Про відновлені здатності або про пружність» – перша друкована праця з вивчення пружних властивостей матеріалів. Результати дослідів з консольними балками дали Р. Гуку змогу дійти висновку, що на опуклій поверхні волокна розтягуються, а на увігнутій – стискаються. Уперше в 1660 р. від виклав закон пропорційності між деформацією та силою, що спричиняє її. Цю залежність, яка становить основу лінійної механіки руйнування, нині називають законом Гука.

Велику експериментальну роботу з дослідження різних балок на двох опорах виконав французький вчений Е. Маріотт. Він уточнив формулу Г. Галілея для розрахунку балок на двох опорах за згину й показав, що балка, навантажена посередині силою та жорстко закріплена на кінцях, витримує вдвічі більше навантаження, ніж така сама шарнірно оперта балка. Вивчення міцності барабана привело Е. Маріотта до висновку, що безпечна товщина циліндричної стінки має бути пропорційна діючому внутрішньому тиску та діаметру барабана.

У XVIII ст. значний внесок у вивчення міцності матеріалів зробив Ш. Кулон. За результатами експериментальних досліджень різних видів деформацій (розтягу, згину, зсуву) він встановив формулу для кута закручування стрижня.

У 1722 р. французький вчений Р. Реомюр уперше опублікував опис дослідів на розтяг, згин і твердість. П. Мушенбрук запропонував конструкцію зразків для проведення дослідів. У 1790 р. Рамю побудував першу машину для випробування металів. У царській Росії питання випробувань металів відображені в перших друкованих працях початку XVIII ст. За Петра I в 1722 р. опубліковано правила обов'язкових механічних випробувань заліза на міцність. У 1725 р. у Петербурзі та в деяких європейських містах створено академії наук, в яких багато уваги приділяли вивченню механічних властивостей матеріалів. Так, Г. Б. Бюльфінгер проводив експериментальні дослідження балок на згин. Російський учений М. В. Ломоносов вивчав твердість матеріалів та їхню міцність в умовах стиску. Він сконструював і побудував кілька приладів для проведення належних дослідів. Теоретичне опрацювання властивостей пружності та міцності матеріалів проводили в той же період Я. Бернуллі, Л. Ейлер, Ж. Лагранж.

Початок XIX ст. характеризується бурхливим розвитком будівництва залізниць, мостів і тунелів, що потребувало розв'язання багатьох науково-технічних задач, у тому числі опору матеріалів. У різних країнах створюються інститути (Петербурзький інститут інженерів шляхів сполучення) та школи (Політехнічна школа у Франції), де зосереджуються видатні вчені-теоретики та експериментатори. Наука про дослідження матеріалів посідає почесне місце в усіх вищих технічних навчальних закладах. Теоретичні дослідження в XIX ст. більше проводили у Франції, експериментальні – у Великій Британії, Німеччині та Росії.

У 1821 р. французький вчений А. Нав'є опублікував працю, в якій сформулював основні положення математичної теорії пружності. У 1826 р. вийшла у світ його книга з опору матеріалів. У 1820 р. англійський учений Т. Юнг ввів поняття про модуль пружності при розтягу та стиску. Він обчислив модуль пружності для сталі – $2 \cdot 10^5$ МПа. Т. Юнг установив також модуль пружності для чавуну, міді й дерева.

У 1829 р. у Петербурзькому інституті шляхів сполучення Г. Ламе спроектував дослідну машину, в якій для навантаження був використаний гідропривід. У 1845-1858 рр. Д.І. Журавський, проектувальник і керівник будівництва мостів Петербурзько-Московської залізниці, теоретично й експериментально досліджував різні конструкції ферм та дійшов висновку, що доцільніше використовувати нерозрізні дерев'яні ферми для визначення допустимих напружень деревини, з якої тоді будували мости. Він провів експериментальні дослідження на спеціально збудованій машині. Д.І. Журавський розробив теорію згину балки й вивів формулу дотичних напружень (1855 р.), яку інженери використовують донині.

У XIX ст. як будівельний матеріал дедалі ширше застосовують сталь. При цьому її механічні властивості особливо ретельно вивчали француз Дюло та інші випускники Політехнічної школи. Маючи добру теоретичну підготовку, вони провели серію досліджень сталі і сталевих

конструкцій з підрахунком їхніх пружних властивостей. Було опрацьовано згин і стійкість стрижнів, згин арок і скручування валів різних перерізів. Дюло показав, що під час скручування нециліндричних валів дотичні напруження в точці змінюються не пропорційно відстані від центра, як це вважалося раніше. У Великій Британії також вивчали властивості будівельних матеріалів. У 1862 р. опубліковано результати визначення механічних властивостей сталі, одержаних під керівництвом Кіркальді.

Наприкінці XIX ст. у Франції зруйнувалися 24 великі мости. Подібні катастрофи відбувалися й в інших країнах. Головна причина руйнування – це втрата стійкості стиснутих елементів. Тому було розпочато вивчення та дослідження тонкостінних конструкцій, які руйнуються внаслідок втрати стійкості. У царській Росії це питання вивчав Ф.С. Ясинський. Щоб з'ясувати дійсну несучу здатність старих і реконструйованих конструкцій мостів широко проводили натурні випробування. Було одержано багатий експериментальний матеріал. Ф.С. Ясинський помітив, що найслабкішими є елементи ферм, які працюють на стиск. Вивчаючи, цю проблему він розвинув теорію Л. Ейлера про позовжний згин і вивів формулу для визначення критичної сили стиснутого стрижня при різних його закріпленнях. Крім того, він склав таблицю для розрахунку стиснутого стрижня, якою користуються й нині. Ф.С. Ясинський вважається одним із засновників теорії стійкості стиснутих стрижнів.

У середині XIX ст. часто траплялися поломки осей вагонів, спричинені втомленістю матеріалу. Для дослідження цього явища створили ексцентрикові машини (приблизно в 1850 р.) з частотою навантаження 4-7 циклів/хв. І хоч припущення про втомленість матеріалів уперше виявив у 1847 р. Г. Гопкінс, широкі наукові дослідження виконав А. Веллер. Він розробив і розпочав єдину систему досліджень, у Німеччині створив найкращі на той час випробувальні машини з консольним та двоопорним (чистим) згином. Машини його конструкції – це крок уперед у технологіях досліджень та випробувань матеріалів, а виконані ним праці становлять основу вчення про втомленість матеріалів.

У XIX ст. створюються науково-дослідні лабораторії в різних країнах світу. Застосовували машини та вимірювальні прилади постійно удосконалювалися. Так, І. Баушингер розробив дзеркальний тензометр, що давав змогу вимірювати відносну деформацію з точністю до $\varepsilon = 1 \cdot 10^{-6}$. Професор А.Г. Аістов створив серію вимірювальних прогинометрів, тензометрів, клинометрів, зсувометрів. У 1895 р. Професор А.Г. Гагарін сконструював нову універсальну дослідну машину, неперевершену в той час за своїми якостями. Професор М. В. Калакуцький вперше ввів поняття про залишкові внутрішні напруження, розробив методику їхнього кількісного визначення і в 1888 р. видав книгу «Дослідження внутрішніх напружень у чавуні і сталі». Професор О.С. Кубасов у 1905 р. запропонував визначати твердість матеріалів вдавлюванням сталевого конуса. У 1874 р. проф. В.Л. Кірпічов установив закон подібності для пружних деформацій. У 1884 р. він опублікував перший том курсу «Опір матеріалів», який відразу ж став класичним підручником.

Завдяки працям учених України та країн Західної Європи в останні роки створені різноманітні випробувальні машини, які ввійшли у практику різних країн (Німеччини, Франції, Бельгії, Великої Британії та ін.). На основі праць М.М. Давиденка, І.А. Оди́нга, С.В. Серенсена, Г.С. Писаренка, Є.О. Патона, В.І. Труфякова, Я.Б. Фрідмана, О.М. Гузя, В.І. Панасюка, С.В. Малашенка та інших створено сучасні випробувальні машини, вимірювальні прилади і пристрої, проведено відповідні дослідження. Зазначене дозволило завдяки отриманим фундаментальним відомостям про механічні властивості матеріалів посісти одне з провідних місць у світовій науці [1-4]. Проте досягнення в дослідженнях і науці могли бути більш вагомими, якби адміністратори від науки не гальмували її розвиток [6, 7].

Металеві та композитні матеріали. Найбільший недолік конструкційних матеріалів – це їхня мала в'язкість (недостатній опір поширенню тріщин) [5, 8, 9]. Міцність і в'язкість твердих тіл можна істотно змінювати, але їхня жорсткість контролю не підлягає. Вона залежить (модуль Юнга) виключно від хімічної природи твердого тіла, засвідчує наскільки матеріал піддатливий. Міцність характеризується напруженням, необхідним для того, щоб цей матеріал зруйнувати. Із порівняно дешевих матеріалів сталь найбільш жорстка [10]. У цьому одна з причин її широкого застосування. Інші матеріали, наприклад пластики або скло, характеризуються низькою жорсткістю, що обмежує їхнє використання в будівельних конструкціях. Впровадження

композиційних матеріалів становить одне з основних питань сучасної інженерної практики. Перевага цих матеріалів визначила їхнє застосування у відповідальних конструкціях (автомобільна, авіаційна і ракетна техніка, турбінобудування, хімічна промисловість та ін.) тому, що на практиці для силових конструкцій впроваджують групу матеріалів, які раніше вважали технічно непотрібними – іонні та напівіонні сполуки, оксиди, нітриди тощо. Нижче наведені приклади композитних матеріалів (рис. 1-3).

Міцність будівельної споруди певною мірою залежить від хімічних і фізичних процесів, які відбуваються на молекулярному рівні. Для того щоб підкреслити, що руйнування настає за якоїсь критичної відстані між атомами зручно записувати відповідне граничне напруження розтягу σ у вигляді $\sigma = \alpha E$, де E характеризує сили міжатомних зв'язків. Із співвідношення сил міжатомного протягування й відповідного їм зміщення виходить, що для всіх тіл верхнє теоретичне значення $\alpha=0,1$. Для більшості реальних матеріалів $0,001 \leq \alpha \leq 0,1$. Звичайні вироби зі скла руйнуються при $\alpha=0,001$, алюмоборосилікатні волокна – при $\alpha=0,04$, міцні сталі – при $\alpha=0,01$. Для тонких скляних волокон і найміцнішого сталевого дроту вже досягнуті значення $\alpha=0,02$. Ці властивості використовують при виготовленні міцних композиційних матеріалів [5, 6].

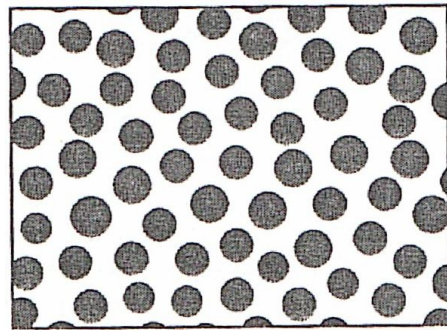


Рис. 1. Ілюстрація розрізу композиту із алюмінію і кварцового волокна (діаметр волокна 50 мкм)

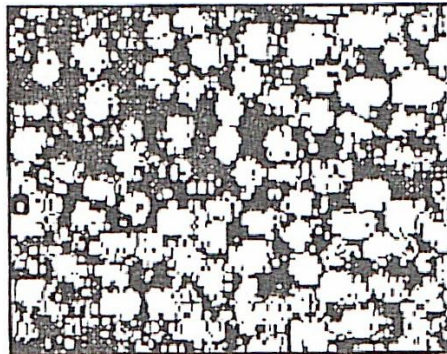


Рис. 2. Структура склопластику

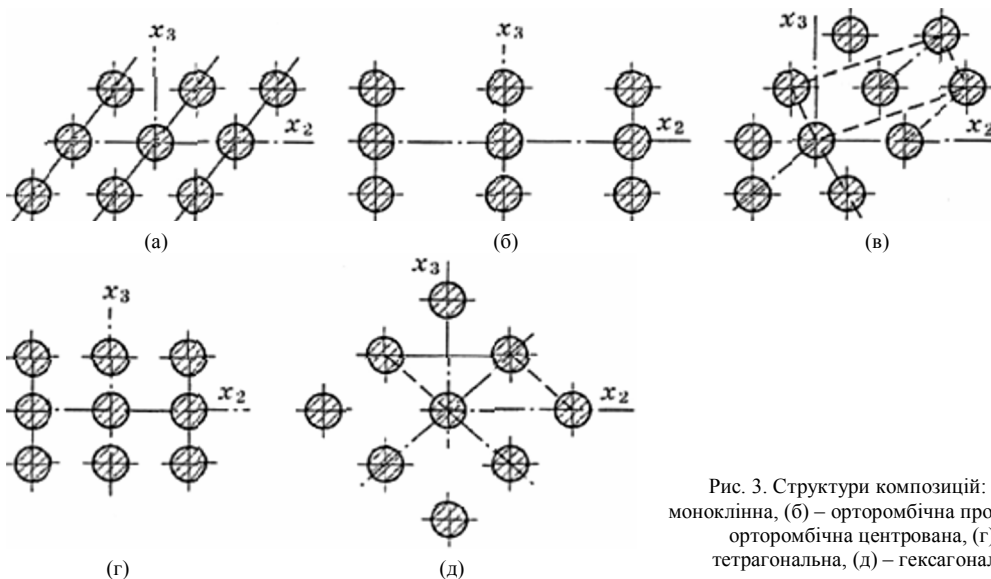


Рис. 3. Структури композицій: (а) – моноклінна, (б) – орторомбічна проста, (в) – орторомбічна центрована, (г) – тетрагональна, (д) – гексагональна

Мікрокартина руйнування різних матеріалів, деталей машин, елементів конструкцій і споруд. Біля витоків механіки руйнування стоять такі вчені, як Леонардо да Вінчі і Галілео Галілей. З іменами Ш. Кулона, А. Сен-Венана, О. Мора, А. Гріффітса, Т. Екобори та інших пов'язаний подальший розвиток цієї науки. В останні роки досягнутий значний прогрес як у

галузі теоретичного обґрунтування питань міцності та руйнування, так і в галузі інженерних застосувань цих результатів. Значний внесок у механіку руйнування зробили українські вчені Г.С. Писаренко, В.В. Панасюк, Г.П. Черепанов, Б.Є. Патон та інші. Викладення деяких питань механіки руйнування можна знайти у книгах В. В. Панасюка, Б.Є. Патона та в семитомному енциклопедичному виданні «Руйнування» (США), перекладеному українською мовою.

Існують різноманітні теорії руйнування й міцності. Наявність структурних включень типу зерен, мікротріщин, дислокацій практично у всіх матеріалах призводить до того, що їхня міцність стає значно меншою за теоретичну. При цьому, чим більша дефектність матеріалу (відхилення структури від ідеальної), тим менша його міцність.

Руйнуванням від втомленості відбувається під дією повторного або циклічного навантаження [11]. За сучасними уявленнями руйнування металів і полімерів від втомленості зумовлене мікронеоднорідністю структури. Як наслідок, виникає локальна концентрація напружень, що створює місце зародження руйнування від втомленості. Етапи зародження та поширення тріщини від втомленості розділити часто неможливо, а тому існує кілька моделей руйнування (рис. 4). На рис. 4 видно дві зони: А – утворена внаслідок поступового розвитку тріщини; В – великозерниста, по якій проходить миттєвий злам після ослаблення робочого перерізу тріщинами від втомленості. У крихких матеріалах – це зона великокристалічної будови, для в'язких матеріалів – це зона в'язкого руйнування (волокниста структура).

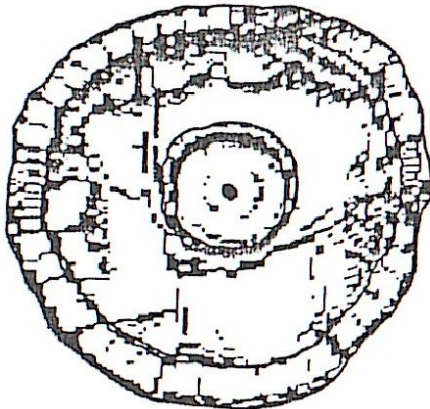


Рис. 4. Характер руйнування дисків зі сплаву ЕІІ437В за високих температур

Неоднорідність конструкційних матеріалів практично є неминучою через особливості металургійного та технологічного оброблення. Це призводить до утворення тріщин і численних дефектів. Останні повільно наростаючи у процесі експлуатації, зумовлюють руйнування. На рис. 4 показано відповідний приклад. Цей процес інколи пов'язують з напруженням пластичної течії або з межею міцності матеріалу при розтягу. У загальному випадку руйнування дисків спричинено руйнівним напруженням матеріалу та пояснюється різними теоріями [9, 12]. Подальші належні дослідження допоможуть зблизити відповідні існуючі уявлення про конструкційну міцність матеріалу.

Відомо, що для роботи конструкції з армованого матеріалу (наприклад, розтяжної пластинки з отвором) характерне те, що концентрація напружень накладається на неоднорідний напружений стан структури матеріалу, а малі дотичні напруження у зв'язувальному стані інколи стають небезпечнішими, ніж максимальні напруження вздовж контуру. Згідно з розрахунками заштрихована частина армованої пластинки (рис. 5 (а)) ослаблена коловим отвором, а залишкова – перебуває в однорідному напруженому стані. Характер руйнування пластинки ілюструє дослід. (рис. 5 (б)).

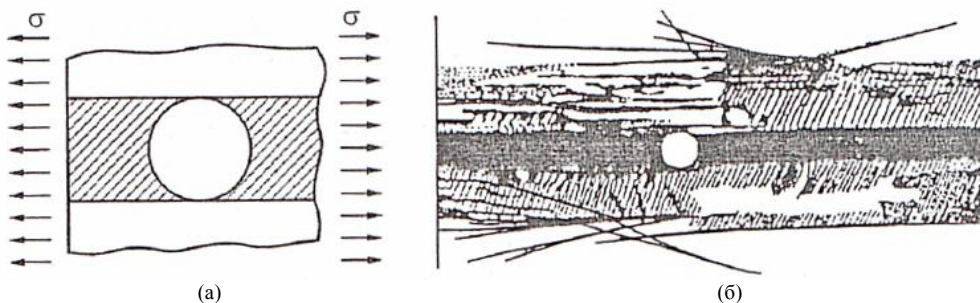


Рис. 5. Характер руйнування армованої пластинки: (а) – структура, ослаблена отвором з концентрацією напружень σ ; (б) – характер руйнування пластинки

Механічні властивості твердого тіла залежать від будови кожного зерна в полікристалічному агрегатному стані, а також від структури і властивостей міжкристалічної речовини. Для вивчення механічних властивостей твердих тіл важливо мати уявлення про структуру матеріалу та її зміну в різних термомеханічних умовах (під час кування, прокату та ін.), подрібнення зерен, утворення, наприклад, волокнистої структури (рис. 6 (а) – лита структура; 6 (б) – волокниста), що приводить до анізотропії властивостей матеріалу.

Отже, причиною руйнування елементів будівельних конструкцій, у більшості випадків, є фізичні та хімічні чинники. Сучасне обладнання та новітні технології досліджень дозволяють визначити й додаткові фактори, які спричиняють руйнацію будівельних матеріалів та конструкцій. Українські вчені-дослідники вносять значний вклад у розвиток світової інженерної науки, їх праці визнані міжнародною науковою спільнотою.

Висновки

1. Вперше проведено історичний еккурс щодо розвитку гіпотез і теорій природи та механізмів руйнування крихких і пластичних матеріалів. Показано вклад у розвиток сучасної механіки деформованого тіла українських вчених-експериментаторів і теоретиків, зокрема, Б.Є. Патона, Г.С. Писаренка, В.В. Панасюка та ін.

2. Причиною руйнування деталей машин та елементів будівельних конструкцій є, насамперед, фізичні та хімічні чинники. З метою виявлення механічних факторів досліджують наявні силові поля конструкції, встановлюють максимальні напруження біля концентраторів, осередок руйнування, виконують належний його макро- та мікроаналіз, визначають залишкові напруження й деформації, знаходять дефекти типу тріщин, крихкі зони, дислокації та ін. Для дефініції хімічних факторів здійснюють аналіз поверхні в зоні руйнування, з'ясовують характер хімічної реакції в кінці корозійної тріщини, діагностують причини локального змінювання структури матеріалу і т.д. Щоб зменшити небезпеку руйнування потрібно модифікувати необхідним чином конструкцію, замінити матеріал, усунути зовнішні причини, виконати додаткові технологічні операції, наприклад, застосувати покриття захисними плівками.

3. Існують різноманітні теорії руйнування та міцності. Наявність структурних включень типу зерен, мікротріщин, дислокацій практично у всіх матеріалах призводить до того, що їхня міцність стає значно меншою за теоретичну. При цьому, чим більша дефектність матеріалу (відхилення його структури від ідеальної), тим менша міцність за інших однакових умов.

4. Завдяки працям учених України та країн Західної Європи в останні роки створені багатоманітні випробувальні машини, вимірювальні прилади і пристрої, проведено відповідні дослідження. Зазначене дозволило отриманим фундаментальним відомостям про механічні властивості матеріалів посісти одне з провідних місць у світовій науці. Вітчизняні вчені вивчили характеристики міцності та повзучості багатьох матеріалів залежно від різних швидкостей деформування, температури, встановили наявність залишкових напружень та інших факторів. Варто також зауважити, що в останні роки увійшли у практику нові методи експериментальних досліджень: електро-тензометричний, поляризаційно-оптичний, мембранної аналогії, лакових покриттів, ультразвуковий, рентгенівський, лазерний та ін. Подальший технічний прогрес неможливий без створення нових методів експериментальних досліджень механічних властивостей матеріалів.

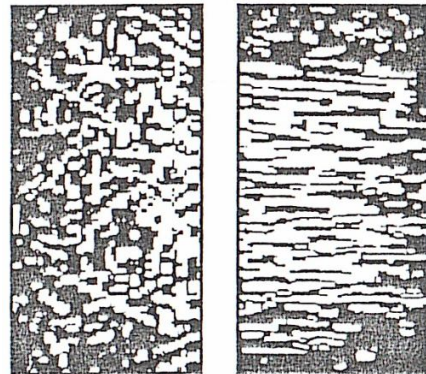


Рис. 6. Утворення волокнистої структури в процесі подрібнення зерен в різних термомеханічних умовах: (а) – лита структура; (б) – волокниста структура

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Писаренко Г.С., Агарев В.А., Квитка А.Л. и др. Сопротивление материалов. Киев: Вища шк., 1986. 775с.
2. Тимошенко С.П. История науки о сопротивлении материалов. Киев: Изд-во науч. техн. литературы, 1957. 536с.

3. Цурпал І.А. Механіка матеріалів і конструкцій. Навч. посібник. Київ: Вища школа, 2005. 367с.
4. Труфяков В.И. Усталость сварных соединений. Киев: Наукова думка, 1990. 256с.
5. Мешков Ю.Я. Физические основы разрушения стальных конструкций. Киев: Наукова думка, 1981. 229с.
6. Макаренко В.Д., Савенко В.І., Гоц В.І., Іванченко Г.М. Корозійна стійкість при динамічному навантаженні будівельних споруд: монографія. Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя. 2025. 120 с.
7. Савенко В.І., Нестеренко І.С., Ключова В.В., Полосенко О.В., Куліков П.М. Проблемы визнання та впровадження інноваційних технологій і відносин науковців з державними інститутами. SWorld Journal. 2024. Issue 27. Part 1. С. 3-13. <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2024-27-00-007>
8. Макаренко В.Д., Гоц В.І., Савенко В.І., Владимиров О.В., Макаренко Ю.В. Експериментальні дослідження кінетики росту тріщин та несучої здатності трубних сталей підземних систем водовідведення. Опір матеріалів і теорія споруд. 2023. Вип. 110. С. 469-482.
9. Макаренко Ю.В., Савенко В.І., Горлач О.М., Задорожнікова О.В., Чигиринець О.Е., Победа С.С. Дослідження кінетики росту тріщин під дією статичних і динамічних навантажень трубних сталей в корозійно-агресивному середовищі NACE. Опір матеріалів і теорія споруд. 2023. Вип. 110. С. 520-532.
10. Макаренко В.Д., Крижанівський С.І., Чернов В.Ю. Проблеми корозійної стійкості промислових трубопроводів. Нафтова і газова промисловість. 2002. №6. - С. 42-44.
11. Макаренко В., Войтович О., Макаренко Ю., Гоц В., Савенко В., Владимиров О., Стогній О., Азутів В. Дослідження впливу корозійного середовища на тривалу втомленість сталевих каналізаційних конструкцій. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки. 2023. Вип. 43. С. 36-44. <https://www.doi.org/10.32347/2524-0021.2023.43.36-44>
12. Макаренко В.Д., Білик С.І., Гоц В.І., Савенко В.І., Владимиров О.В., Шатрова І.А. та ін. Кінетика тріщиноутворення в сталевих конструкціях: монографія. Київ: НУБіП України, 2023. 248с.

REFERENCES

1. Pysarenko H.S., Aharev V.A., Kyutka A.L. i dr. Soprotivlenie materialov (Strength of Materials). - Kyiv: Vyscha shk., 1986. - 775 s.
2. Tymoshenko S.P. Istoriia nauki o soprotivlenii materialov (History of the science of strength of materials). - Kiev: Yzd-vo nauch. tekhn. literatury, 1957. - 536 s.
3. Tsurpal I.A. Mekhanika materialiv i konstruktсии (Mechanics of materials and structures). Navch. posibnyk. - Kyiv: Vyscha shkola, 2005. - 367 s.
4. Trufiakov V.Y. Ustalost svarynykh soedinenii (Fatigue of welded joints). - Kyiv: Naukova dumka, 1990. - 256 s.
5. Meshkov Yu.Ia. Fizicheskie osnovy razrusheniia stalnykh konstruktсии (Physical principles of destruction of steel structures). - Kyiv: Naukova dumka, 1981. - 229 s.
6. Makarenko V.D., Savenko V.I., Hots V.I., Ivanchenko H.M. Koroziiina stiikist pry dynamichnomu navantazhenii budivelnnykh sporud: monohrafiia (Corrosion resistance under dynamic loading of building structures: monograph). - Nizhyn: NDU im. M. Hoholia. 2025. - 120 s.
7. Savenko V.I., Nesterenko I.S., Kliuieva V.V., Polosenko O.V., Kulikov P.M. Problemy vyznannia ta vprovadzheniia innovatsiinykh tekhnolohii i vidnosyn naukotsiv z derzhavnymy instytutamy (On the problems of recognition and implementation of innovative technologies and relations between scientists and state institutions). - SWorld Journal. 2024. Issue 27. Part 1. S. 3-13. <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2024-27-00-007>
8. Makarenko V.D., Gots V.I., Savenko V.I., Vladimirov O.V., Makarenko Y.V. Eksperymentalni doslidzhennia kinytyky rostu trishchyn ta nesuchoi zdatnosti trubnykh stalei pidzemnykh system vodovidvedennia (Experimental studies of crack growth kinetics and bearing capacity of steel pipes of underground water distribution systems) // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles. - K.: KNUBA, 2023. - Issue 110. - P. 469-482.
9. Makarenko Yu.V., Savenko V.I., Gorlach O.M., Zadorozhnikova I.V., Chygyrynets' O.E., Pobeda S.S. Doslidzhennia kinytyky rostu trishchyn pid diieiu statychnykh i dynamichnykh navantazhen trubnykh stalei v koroziiino-ahresyvnomu seredovyshchi NASE (Research of the kinetics of crack growth under the action of static and cyclic loads of pipe steel in a NACE corrosion-aggressive environment) // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-Technical collected articles - Kyiv: KNUBA, 2023. - Issue 110. - P. 520-532.
10. Makarenko V.D., Kryzhanivskiy Ye.I., Chernov V.Iu. Problemy koroziiinoi stiikosti promyslovykh truboprovodiv (Problems of corrosion resistance of industrial pipelines). - Naftova i hazova promyslovist. 2002. №6. - S. 42-44.
11. Makarenko V., Voitovykh O., Makarenko Yu., Hots V., Savenko V., Vladymyrov O., Stohnii O., Azutov V. Doslidzhennia vplyvu koroziiinoho seredovyshcha na tryvalu vtomlenist stalevykh kanalizatsiinykh konstruktсии (Research into the influence of corrosive environments on the long-term fatigue of steel sewer structures). - Problemy vodopostachannia, vodovidvedennia ta hidravliki. 2023. Vyp. 43. S. 36-44. <https://www.doi.org/10.32347/2524-0021.2023.43.36-44>
12. Makarenko V.D., Bilyk S.I., Hots V.I., Savenko V.I., Vladymyrov O.V., Shatrova I.A. ta in. Kinytyka trishchynoutvorennia v stalevykh konstruktсииakh: monohrafiia (Kinetics of Crack Formation in Steel Structures: Monograph). - Kyiv: NUBiP Ukrainy, 2023. - 248 s.

Стаття надійшла 24.08.2025

Терещук М.О., Макаренко В.Д., Савенко В.І., Гончаренко Т.А., Бондаренко М.І.

ГЕНЕЗИС РОЗВИТКУ ГІПОТЕЗ, ТЕОРІЙ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ МІЦНОСТІ ТА РУЙНУВАННЯ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ І КОНСТРУКЦІЙ

Вперше проведено історичний експурс щодо розвитку гіпотез і теорій природи та механізмів руйнування крихких і пластичних матеріалів. Показано вклад у розвиток сучасної механіки деформованого тіла українських вчених-експериментаторів і теоретиків, зокрема, Б.Є. Патона, Г.С. Писаренка, В.В. Панасюка та ін. Причиною руйнування деталей машин та елементів будівельних конструкцій є, насамперед, фізичні та хімічні чинники. З метою виявлення механічних факторів досліджуються наявні силові поля конструкції, встановлюються максимальні напруження біля концентраторів, визначається осередок руйнування, проводиться належний його макро- та мікроаналіз, уточнюються залишкові напруження й деформації, знаходяться дефекти типу тріщин, крихкі зони, дислокації та ін. Для дефініції хімічних факторів проводять аналіз поверхні в зоні руйнування, з'ясовують характер хімічної реакції в кінці корозійної тріщини, діагностують причини локального змінювання структури матеріалу і т. д. Щоб зменшити небезпеку руйнування потрібно модифікувати необхідним чином конструкцію, замінити матеріал, усунути зовнішні причини впливу, застосувати додаткові технологічні операції, наприклад, виконати покриття захисними плівками. Існують різноманітні теорії руйнування. Наявність структурних включень типу зерен, мікротріщин, дислокацій практично у всіх матеріалах призводить до того, що їхня міцність стає значно меншою за теоретичну. При цьому, чим більша дефектність конструкційного матеріалу (відхилення його структури від ідеальної), тим менша міцність за інших однакових умов. У випадках, коли руйнування відбувається під дією повторного або циклічного навантаження, то його класифікують як руйнування від втомленості. Зазначене явище дослідили У. Ранкіна та А. Веллер понад 100 років тому. Нині механіку від втомленості покладено в основу проєктування та розрахунку більшості динамічно напружених конструкцій і машин. Це пов'язано з підвищенням експлуатаційної надійності, зниженням ваги та поліпшенням економічних показників конструкцій. Завдяки працям учених України та країн Західної Європи в останні роки створені різноманітні випробувальні машини, які ввійшли у практику наукових досліджень різних країн (Німеччини, Франції, Бельгії, Великої Британії та ін.). На засадах робіт М. М. Давиденка, І. А. Одінга, С. В. Серенсен, Г. С. Писаренка, С. О. Патона, В. І. Труфякова, Я. Б. Фрідмана, О. М. Гузя, В. І. Панасюка, С. В. Малашенка та інших вчених створено належні сучасні випробувальні машини, вимірювальні прилади і пристрої, проведено відповідні дослідження. Зазначене дозволило отриманим фундаментальним відомостям про механічні властивості матеріалів посісти одне з провідних місць у світовій науці. Вітчизняні вчені вивчили характеристики міцності та повзучості багатьох матеріалів залежно від різних швидкостей деформування, температури, встановили наявність залишкових напружень та інших факторів. Варто також зауважити, що в останні роки увійшли у практику нові методи експериментальних досліджень: електро-тензометричний, поляризаційно-оптичний, мембранної аналогії, лакових покриттів, ультразвуковий, рентгеновський, лазерний та ін. Подальший технічний прогрес неможливий без створення нових методів експериментальних досліджень механічних властивостей матеріалів.

Ключові слова: генезис, деформації, тріщини, пластичні зони, тріщиностійкість, властивості матеріалів, міцність, втомленість металу.

Tereshchuk M.O., Makarenko V.D., Savenko V.I., Honcharenko T.A., Bondarenko M.I.

GENESIS OF THE DEVELOPMENT OF HYPOTHESES, THEORIES AND EXPERIMENTAL RESEARCH ON THE STRENGTH AND DESTRUCTION OF BUILDING MATERIALS AND STRUCTURES

For the first time, a historical overview of the development of hypotheses and theories on the nature and mechanisms of destruction of brittle and plastic materials has been conducted. The contribution of Ukrainian experimental scientists and theorists, in particular B. E. Paton, G. S. Pysarenko, V. V. Panasyuk, and others, to the development of modern mechanics of deformed bodies is shown. The main causes of destruction of machine parts and elements of building structures are physical and chemical factors. In order to identify mechanical factors, the existing force fields of the structure are studied, the maximum stresses near the concentrators and the center of destruction are established, its macro- and microanalysis is performed, residual stresses and deformations are determined, and defects such as cracks, brittle zones, dislocations, etc. are found. To define chemical factors, the surface in the failure zone is analyzed, the nature of the chemical reaction at the end of the corrosion crack is determined, the causes of local changes in the material structure are diagnosed, etc. To eliminate or reduce the risk of failure, it is necessary to modify the design as required, replace the material, eliminate external causes, and perform additional technological operations, such as applying protective coatings. There are various theories of destruction. The presence of structural inclusions such as grains, microcracks, and dislocations in virtually all materials leads to their strength becoming significantly lower than theoretical. At the same time, the greater the defectiveness of the structural material (the deviation of its structure from the ideal), the lower the strength under other identical conditions. If destruction occurs under the action of repeated or cyclic loading, it is called fatigue destruction. This phenomenon was discovered by W. Rankine and A. Weller over 100 years ago. Today, fatigue mechanics is the basis for the design and calculation of most dynamically stressed structures and machines. This is due to increased operational reliability, reduced weight, and improved economic performance of structures. Thanks to the work of scientists from Ukraine and Western European countries, a variety of testing machines have been created in recent years, which have been put into practice in various countries (Germany, France, Belgium, Great Britain, etc.), based on the work of M. M. Davydenko, I. A. Odin, S. V. Serenese, G. S. Pysarenko, E. O. Paton, V. I. Trufyakov, Ya. B. Friedman, O. M. Guz, V. I. Panasyuk, S. V. Malashenko, and others, appropriate modern testing machines, measuring instruments, and devices have been created, and relevant research has been conducted. This allowed the fundamental knowledge obtained about the mechanical properties of materials to take one of the leading places in world science. Domestic scientists studied the strength and creep characteristics of many materials depending on different deformation rates and temperatures, and established the presence of residual stresses and other factors. It should also be noted that in recent years, new methods of experimental research have come into practice, such as electro-tensometric, polarization-optical, membrane analogy, lacquer coatings, ultrasonic, X-ray, laser, and others. Further technical progress is impossible without the creation of new methods of experimental research of the mechanical properties of materials.

Keywords: genesis, deformations, cracks, plastic zones, crack resistance, material properties, strength, metal fatigue.

УДК 621.791.11:693

Терещук М.О., Макаренко В.Д., Савенко В.І., Гончаренко Т.А., Бондаренко М.І. Генезис розвитку гіпотез, теорій та експериментальних досліджень міцності та руйнування будівельних матеріалів і конструкцій //Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірник. – К.: КНУБА, 2025. – Вип. 115. – С. 416-424.

Вперше проведено історичний екскурс щодо розвитку гіпотез і теорій природи та механізмів руйнування крихких і пластичних матеріалів. Показано вклад у розвиток сучасної механіки деформованого тіла українських вчених-експериментаторів і теоретиків, які вивчали характеристики міцності багатьох матеріалів залежно від різних швидкостей деформування, температури, встановили наявність залишкових напружень та інших факторів. Зазначено, що подальший технічний прогрес неможливий без створення нових методів експериментальних досліджень механічних властивостей матеріалів.

Іл. 6. Бібліогр. 12 назв.

UDC 621.791.11:693

Tereshchuk M.O., Makarenko V.D., Savenko V.I., Honcharenko T.A., Bondarenko M.I. Genesis of the development of hypotheses, theories and experimental research on the strength and destruction of building materials and structures // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles. – K.: KNUCA, 2025. – Issue 115. – P. 416-424.

For the first time, a historical excursion has been conducted regarding the development of hypotheses and theories of the nature and mechanisms of fracture of brittle and plastic materials. The contribution to the development of modern mechanics of deformed bodies of Ukrainian experimental scientists and theorists who studied the strength characteristics of many materials depending on different deformation rates, temperature, established the presence of residual stresses and other factors is shown. It is noted that further technical progress is impossible without the creation of new methods of experimental research of the mechanical properties of materials.

Figs. 6. Refs. 12.

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, докторант кафедри архітектурних конструкцій ТЕРЕЩУК Микола Олександрович

Адреса: 03037 Україна, м. Київ, пр. Повітряних Сил 31, Київський національний університет будівництва і архітектури

Тел.: +38 (044) 241-55-55

E-mail: nikolatereschuk@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4444-3677>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор, професор кафедри технології будівельних конструкцій і виробів МАКАРЕНКО Валерій Дмитрович

Адреса: 03037 Україна, м. Київ, пр. Повітряних Сил 31, Київський національний університет будівництва і архітектури

Тел.: +38 (044) 241-55-55

E-mail: green555tree@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9178-9657>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): доктор технічних наук (ФРН), професор, професор кафедри організації та управління будівництвом САВЕНКО Володимир Іванович

Адреса: 03037 Україна, м. Київ, пр. Повітряних Сил 31, Київський національний університет будівництва і архітектури

Тел.: +38 (044) 241-55-55

E-mail: savenko.vi@knuba.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1490-6730>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних технологій ГОНЧАРЕНКО Тетяна Андріївна

Адреса: 03037 Україна, м. Київ, пр. Повітряних Сил 31, Київський національний університет будівництва і архітектури

Тел.: +38 (044) 241-55-55

E-mail: goncharenko.ta@knuba.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2577-6916>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри професійної освіти та комп'ютерних технологій БОНДАРЕНКО Микола Іванович

Адреса: 03037 Україна, м. Глухів, Глухівський національний педагогічний університет імені Олександра Довженка

Тел.: +38 (044) 241-55-55

E-mail: bondarenkonikolayy58@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3058-1278>