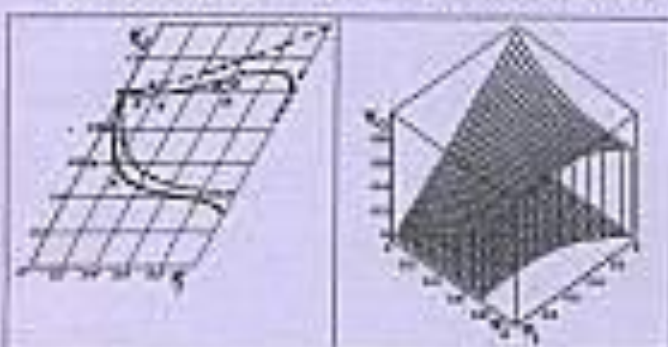


П.М. Михальчук

ТЕНЗОРНІ МОДЕЛІ НАКОПИЧЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ



$$v_2(t) = \int_0^t \sigma(t-\tau) \cdot \mathcal{D}_2(\sigma(\tau), \psi_1(\tau)) \cdot \psi_1(\tau) \cdot d\tau$$

Визначення
функції

Тензорна модель
накопичення пошкоджень

УДК 539.3

Рецензенти:

А. О. Лебедев, академік НАН України, доктор технічних наук, професор;

В. В. Кривенюк, доктор технічних наук, професор;

О.Г. Бунтар, доктор фізико-математичних наук

В. М. Михалевич

Тензорні моделі накопичення пошкоджень. Монографія. — Вінниця:
«УНІВЕРСУМ-Вінниця», 1998. - 195 с.

Іл.:27 Табл. 10 Бібліогр.: 326 назв.

ISBN 966-7199-20-7

Викладено основи тензорної теорії накопичення пошкоджень в матеріалах та результати дослідження закономірностей руйнування при непружному деформуванні.

Для наукових та інженерно-технічних працівників; може бути корисною для аспірантів та студентів технічних вузів.

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького державного технічного університету (протокол № 3 від 28.11.1997 року)

ISBN 966-7199-20-7

© В. Михалевич, 1998

ЗМІСТ

Передмова	5
Вступ.....	6
Розділ I. Задачі та методи механіки пошкоджень.....	7
1.1Класифікація процесів навантаження	7
1.2Класифікація процесів деформування	12
1.3Класифікація та аналіз моделей накопичення пошкоджень.....	14
Розділ 2. Моделі граничних деформацій при гарячому деформуванні	
початково ізотропних тіл.....	30
2.1Основні гіпотези.....	30
2.2Лінійна модель накопичення пошкоджень.....	31
2.3Квазілінійна модель та апроксимації ядер пошкоджень.....	48
2.4Зіставлення розрахункових та експериментальних даних для окремих випадків класу квазіпростого гарячого деформування	53
2.5Циклічне деформування.....	60
Розділ 3. Тензорні моделі тривалої міцності.....	72
3.1Про зв'язок теорії О.А. Ільюшина з класичними критеріями тривалої міцності.....	72
3.2Тривала міцність при стаціонарному навантаженні.....	78
3.3Лінійна та квазілінійна моделі для початково ізотропних тіл.....	85
3.4Двоступеневе навантаження.....	90
3.5Багатоступеневе навантаження з паузами та без пауз.....	102
3.6Двохетапне та багатоетапне навантаження	111
3.7Складне навантаження.....	113
Розділ 4. Моделі граничних деформацій при холодному деформуванні.....	123
4.1Функції пошкоженості.....	123
4.2Двохетапне деформування.....	126
4.3 Багатоетапне і циклічне деформування.....	134
4.4Багатоетапне деформування некомпактних матеріалів.....	138

Розділ 5. Узагальнення побудови моделей накопичення пошкоджень.....	142
5.1 Представлення міри пошкоджень функціоналом.....	142
5.2 Неповне відновлення пластичності в паузі.....	149
5.3 Головна нелінійна модель.....	152
5.4 Моделі для тіл з початковою і деформаційною анізотропією граничних деформацій.....	154
Розділ 6. Технологічні задачі обробки тиском.....	165
6.1 Способи кування	165
6.2 Способи та пристрої для пресування компактних і некомпактних матеріалів.....	166
6.3 Ізотермічне вальцювання.....	168
6.4 Поверхнево - пластичне деформування.....	171
Література	174

ПЕРЕДМОВА

У процесі розв'язання комплексу питань, пов'язаних з міцністю, з'явився розділ механіки деформівного твердого тіла, що отримав найменування механіки руйнування. Поряд з розділом механіки руйнування, що називається механікою тріщин, за останні десятиріччя інтенсивного розвитку набув розділ, який називають механікою пошкоджень або механікою розсіяного руйнування. За останні майже, два десятиліття тензорна теорія накопичення пошкоджень набула суттєвого розвитку, особливо в плані застосування до описання процесів непружного деформування. Наскільки відомо автору до цього часу не з'явилося окремих монографій, що присвячені викладенню зазначеної теорії. На жаль, внаслідок малого об'єму цієї монографії, автор обмежився стислим викладенням власних результатів, які, до того ж, одержані переважно за останні півтора десятиліття.

Книга розрахована насамперед на фахівців в теорії міцності. Вона може бути корисною і для студентів, що вивчають механіку деформівного твердого тіла, зокрема, опір матеріалів. До того ж у цій роботі розглянуто всі етапи математичного моделювання: постановка проблеми; формулювання гіпотез та найпростіших вихідних співвідношень моделі; розв'язання тестових задач, аналітичне дослідження здобутих співвідношень, зокрема, в зіставленні з експериментальними даними; обґрунтування необхідних ускладнень вихідних співвідношень для вдосконалення моделі; застосування знайдених закономірностей досліджуваних явищ в інженерній практиці. При цьому в роботі використовується елементи більшості розділів вищої математики, що вивчають студенти технічних вузів, а саме: аналітична геометрія та лінійна алгебра, теорія границь, неперервність функцій, застосування похідних до дослідження функцій, частинні похідні, методи інтегрування однократних та двократних інтегралів, диференціальні рівняння, ряди, математична статистика, чисельні методи тощо. Отже, книгу можна рекомендувати і як навчальний посібник для тих, хто вивчав та викладав основи вищої математики.

Автор висловлює щирі подяки А.О. Лебедеву за постійну увагу та плідне обговорення результатів цієї роботи, а також вдячний В.В. Кривенюку та О.Г. Бунтарю - за ряд цінних зауважень.

ВСТУП

Зміст та методи механіки розсіяного руйнування викладено в [29,103,193,249,285]. Центральним поняттям даної наукової дисципліни є пошкодження. В [193] під пошкодженням розуміються мікроструктурні зміни, що призводять до деякого погіршення властивостей матеріалу. Напевне більш точним є наступне означення. Під пошкодженням (дефектом) розуміється макрооб'єкт, що дозволяє отримати механічний опис ступеня зміни властивостей матеріалу.

Незважаючи на значні успіхи, що досягнуто механікою пошкоджень, вона має ряд проблем, розв'язання яких дозволить суттєво підвищити ефективність її інженерних застосувань. Однією з перших у цьому ряді є проблема опису накопичення пошкоджень в матеріалах при нестационарних процесах непружного деформування. В таких процесах на закономірності руйнування матеріалів у значній мірі впливають не тільки інваріанти, але й головні напрямлення тензорів напружень та швидкостей деформацій.

Перш за все, це стосується гарячого пластичного деформування. У цій галузі до порівняно недавнього часу були практично відсутні праці, присвячені аналітичному опису та дослідженню особливостей руйнування, що супроводжується ефектами спадковості. Що ж стосується тривалої міцності, то тут існує багато підходів: від простих моделей, які описують вузький клас навантажень, до складних теорій, скористатися якими, у кращому разі, можуть тільки автори розробок. Досить перспективним у цій області виглядав розробка моделей спадкового типу. Але відомі дослідження моделей спадкового типу мають фрагментарний характер, а тензорні властивості розробленої О.А. Ільюшиним моделі взагалі не досліджувались та не використовувались.

Найбільш високого рівня розвитку досягли тензорні моделі накопичення пошкоджень для опису холодного пластичного деформування. Але нез'ясованим був взаємозв'язок теорії деформівності з теорією О.А. Ільюшина, не вирішеними залишались задачі опису початкової анізотропії граничних деформацій, врахування третього інваріанта девіатора пошкоджень та деякі інші.

Мета цієї роботи - подати систематичне викладення тензорної теорії накопичення пошкоджень та висвітлити її місце серед інших моделей руйнування матеріалів.

I. ЗАДАЧІ ТА МЕТОДИ МЕХАНІКИ ПОШКОДЖЕНЬ

1.1 Класифікація процесів навантаження

Змістом цієї роботи є розробка тензорної теорії накопичення пошкоджень в матеріалах за різних умов зовнішнього впливу.

Розробці моделей накопичення пошкоджень та дослідженню процесів руйнування з позицій механіки пошкоджень присвячена численна література [1,4+6,8+39,41+44,47+56,59,61+70,74+78,80,81, 83,85,88,89,91,92,94+122, 124,125,127,129+136,139+143,145+149, 174+196,198+209,211,212,214+222]. Тому виникає задача порівняння різних моделей та впливаючих із них співвідношень для демонстрації переваг та особливостей пропонуємого варіанта моделей. До того ж розробка будь-якої моделі нерозривно пов'язана з задачею визначення меж її застосування. Розв'язання цих задач практично неможливо без наявності класифікації процесів навантаження.

Вивчення літератури [35,60,62,67,73,76,84,87,93,98,101,103,109,130,141,147, 174,175,177,183,189,190,201,206, 208,215,232+234, 245, 249+251, 259,262, 265,272, 277,279,295,313,314] показало наступне. По-перше відсутня загальноживана термінологія для характеристики процесів навантаження. По-друге, існуючі строгі означення дано тільки для декількох достатньо широких класів навантаження. І по-третє, виділення із загального класу навантажень деяких окремих випадків було пов'язане з особливостями розв'язуємих задач та розробляємих теорій пластичності і повзучості для встановлення зв'язку компонент тензора напружень σ_{ij} і тензора швидкостей деформацій ε_{ij} . Побудова теорії тривалої міцності має ряд особливостей. Наприклад, відомо, що в ряді випадків границя текучості матеріалу не залежить від середнього напруження σ , що відображується в широко застосовній умові пластичності Мізеса. Але ж тривала міцність досить сильно залежить від середнього напруження. Як це позначається на класифікації буде назначено нижче.

Почнемо з деяких відомих означень. Процес навантаження називається простим, якщо напрямний тензор напружень $\beta_{ij} \equiv s_{ij}/(s_{ij} \cdot s_{ij})^{0.5}$ (s_{ij} – девіатор напружень) не залежить від часу [87].

В [250, с.68] відмічається, що "... уравнения деформационной теории дают достаточно хорошие результаты в том случае, когда все компоненты девизатора напряжений изменяются в процессе нагружения пропорционально одному и тому же параметру α , называемому параметром нагружения. Это значит, что можно принять

$$s_{ij} = s_{ij}^{(0)} \cdot \alpha.$$

(1.1)

Здесь α - параметр, монотонно меняющийся от нуля до единицы;
 $s_{ij}^{(0)}$ - напряжения в конечном состоянии". Из назви параграфа, звідки взято цитату, випливає, що таке навантаження називається пропорційним. Далі на с. 69 згадується про випадок пропорційної зміни компонент тензора напружень, але відповідних означень не приведено.

В [265, с.433] вказується, що ми маємо "... пропорциональное нагружение, когда

$$P^{ij} = \chi \cdot P_o^{ij}, T = T_o$$

где P^{ij} - некоторый постоянный тензор, а χ - переменный скалярный параметр, T - температура."

"Простыми процессами деформирования или нагружения элемента тела называются процессы, проходящие по прямолинейным траекториям в соответствующих изображающих пространствах деформации или напряжения" [314, с. 97].

"Простым называется такое нагружение, при котором компоненты девиатора напряжений возрастают пропорционально некоторому параметру. В противном случае нагружение называется сложным" [140, с.62].

"Большая часть опытных данных относится к простому нагружению, когда компоненты девиатора напряжений изменяются пропорционально некоторому параметру Тогда увеличению $\dot{\epsilon}$ соответствует состояние нагружения, уменьшению $\dot{\epsilon}$ - состояние разгрузки" [93, с.38].

Наведених цитат достатньо для здійснення аналізу існуючих означень та для обґрунтування необхідності розробки більш повної класифікації процесів навантаження.

На перший погляд означення Л.І. Седова та Ю.М. Работнова тотожні. Але в (1.1) параметр a - невід'ємна монотонно змінювана величина, а в (1.2) параметр χ - змінний скалярний параметр. Ця різниця досить суттєва. З точністю до термінології означення Ю.М. Работнова співпадає з означенням М.М. Малініна, а означення Л.І. Седова з означенням Л.М. Качанова. Процес, який в [140] називається простим, в [250] називається пропорційним. Ще складніше і зашпуганіше стоїть справа з означенням процесів, відмінних від простого.

В зв'язку з викладеним розроблено наступну класифікацію.

1. Навантаження незмінним у часі напруженням $\sigma_{ij}(t) = \sigma_{ij}^{(0)} = const$ (σ_{ij} - тензор напружень, t - час) називається стаціонарним. В цьому випадку

інтенсивність напружень $\sigma_U(t) = \sigma_U^0 = const$ ($\sigma_u = \sqrt{((3/2) \cdot s_{ij} \cdot s_{ij})}$;

$s_{ij} == \sigma_{ij} - \sigma \cdot \delta_{ij}$ - девіатор напружень; $\sigma = \sigma_{ii}/3$ - середнє напруження; δ_{ij} -

символ Кронекера, $\delta_{ij} = 1$ при $i = j$ та $\delta_{ij} = 0$ при $i \neq j$ безрозмірні інваріанти напруженого стану $\eta(t) = \eta^{(0)} = const$ ($\eta = 3 \cdot \delta / \delta_u$) і $\xi = \xi^{(0)} = const$ ($\xi = \sqrt{6} \cdot \beta_{ij} \cdot \beta_{jk} \cdot \beta_{ki}$) Показник η характеризує середнє напруження, показник ξ - вид напруженого стану.

2. Навантаження сталим девіатором напружень $s_{ij}(t) = s_{ij}^{(0)} = const$ вільне деформування по В.В. Соколовському [277]. У цьому випадку $\sigma_u(t) = \sqrt{\left(\frac{3}{2}\right) \cdot s_{ij}^{(0)} \cdot s_{ij}^{(0)}} = \sigma_u^{(0)} = const, \beta_{ij}(t) = \sqrt{2/3} \cdot \frac{s_{ij}^{(0)}}{\sigma_u^{(0)}} = \beta_{ij}^{(0)} = const,$ отже і $\xi = \xi^{(0)} = const$. Середнє напруження, отже і показник η можуть змінюватися довільним чином. Прикладом такого процесу може бути розтяг із сталою величиною інтенсивності напруження на фоні змінюємого гідростатичного тиску.

3. Навантаження, при якому компоненти тензора напружень змінюються пропорційно деякому невід'ємному скалярному параметру $C(t)$:

$$\sigma_{ij}(t) = \sigma_{ij}^0 \cdot C(t), \quad C(t) \geq 0, \quad (1.3)$$

називається пропорційним.

При цьому компоненти девіатора напружень $s_{ij}(t) = (\sigma_{ij}^0 - \sigma^{(0)} \cdot \delta_{ij}) \cdot C(t) = s_{ij}^{(0)} \cdot C(t)$ також змінюються пропорційно даному параметру C . Інтенсивність напружень дорівнює $\sigma_u(t) = \sqrt{(3/2) \cdot s_{ij}^{(0)} \cdot s_{ij}^{(0)}} \cdot C(t) = \sigma_u^0 \cdot C(t)$ і може змінюватися довільним чином. Компоненти напрямного тензора

$$\beta_{ij}(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot s_{ij}^{(0)} \cdot C(t) = \sigma_{ij}^0 \cdot C(t) / (\sigma_u^0 \cdot |C(t)|) = \beta_{ij}^{(0)}, \quad (1.4)$$

показники $\eta(t) = 3 \cdot \sigma^{(0)} \cdot C(t) / (\sigma_u^0 \cdot C(t)) = \eta^{(0)}$ і $\xi = \xi^{(0)}$ залишаються незмінними. Таке означення уточнює означення Л.І. Седова та Л.М. Качанова введенням умови невід'ємності параметра $C(t)$. В протилежному випадку під це означення підпадають процеси із зміною головних напрямів напрямного тензора. Дійсно, якщо відмовитися від умови $C \geq 0$, то згідно з (1.4) $\beta_{ij}(t) = \beta_{ij}^{(0)}$ при $C > 0$ і $\beta_{ij}(t) = -\beta_{ij}^{(0)}$ при $C < 0$. Найпростішим прикладом такого роду в процес з чергуванням розтягу та стиску. Прикладом пропорційного навантаження є розтяг з довільною зміною величини осьового напруження.

4. Процес, при якому компоненти девіатора напружень змінюються пропорційно деякому невід'ємному скалярному параметру $C(t)$:

$$s_{ij}(t) = s_{ij}^{(0)} \cdot C(t), \quad C(t) \geq 0 \quad (1.5)$$

називається простим навантаженням. В даному випадку як і в попередньому 0, $\beta_{ij}(t) = \beta_{ij}^{(0)}$, $\xi(t) = \xi^{(0)}$ - сталі, а інтенсивність напружень $\sigma_U(t) = \sigma_U^0 \cdot C(t)$ - змінюється довільним чином. На відміну від пропорційного навантаження при простому навантаженні показник $\eta(t) = 3 \cdot \sigma(t) / (\sigma_u^{(0)} \cdot C(t))$ - не є сталим. На відміну від простого навантаження при пропорційному навантаженні середнє напруження не змінює знак.

Найпростішим прикладом такого процесу є розтяг в камері з регулюємым тиском за умови довільної зміни осьового та гідростатичного напружень.

Таке означення простого навантаження еквівалентно означенню О.А.Ільюшина. Дійсно, вище вже було показано, що із умови (1.5) випливає рівність $\beta_{ij}(t) = \beta_{ij}^{(0)}$. Якщо в якості вихідної прийняти умову $\beta_{ij}(t) = \beta_{ij}^{(0)} = const$, то $s_{ij}(t) = \sqrt{2/3} \cdot \sigma_u^{(0)} \cdot C(t) / \beta_{ij}^{(0)} = s_{ij}^{(0)} \cdot C(t)$.

Очевидно, що процеси 1 - 3 є окремими випадками простого навантаження. Характеристика цього класу навантаження буде більш повною якщо ввести ознаку монотонності, в залежності від характеру зміни величин σ_u η . Просте навантаження по М.М. Малініну в рамках розроблюємої класифікації є простим монотонно зростаючим навантаженням.

Аналогічним чином пропонується класифікувати процеси складного навантаження, при якому $\beta_{ij} = const$.

5. Квазістаціонарне навантаження - нестаціонарне навантаження, при якому змінюються тільки напрями головних осей напрямного тензора. При цьому $\sigma_u, \eta, \xi = const$.

6. Клас поетапних навантажень - навантаження при якому компоненти $\sigma_{ij} \neq 0$ змінюються дискретно. Якщо, до того ж, реалізується вільне деформування, пропорційне або просте навантаження, то маємо відповідно клас вільних ступеневих, пропорційних ступеневих навантажень та ступеневих навантажень.

Клас поетапних навантажень це є багатоетапне навантаження з проміжними паузами між етапами. В період пауз $\sigma_{ij} = 0$. За умови, що $\sigma_{ij} \neq 0$ або, що те ж саме, σ_u і η одночасно не дорівнюють нулеві на скінченному інтервалі часу, маємо клас багатоетапного навантаження. Аналогічно визначається клас багатоступеневого навантаження з паузами і багатоступеневого навантаження (без пауз).

В даній роботі розглядається також циклічне навантаження, означення якого буде дано у відповідному підрозділі.

Характеристика процесів навантаження пов'язана з характеристикою напруженого стану. Напружений стан буває одноосьовим (лінійним),

двохосьовим (плоским) і триосьовим (об'ємним). Плоский напружений стан може бути простим - просте кручення і складним - спільний розтяг з крученням.

Якщо навантаження сталим девіатором напружень здійснюється за умови плоского напруженого стану, то показник η може змінюватися, але не довільним чином. Як буде показано в розділі 3, при плоскому напруженому стані і фіксованому ξ параметр η може приймати три різних значення. З цієї самої причини стосовно до плоского напруженого стану розділення на просте і пропорційне навантаження мав в основному тільки теоретичне значення.

Наявність розробленої класифікації дозволяє ранжирувати різні моделі за ступенем та характером відображення ними закономірностей накопичення пошкоджень, що притаманні різним класам навантажень та окреслити межі застосування тих або інших співвідношень, що є в літературі, а також запропонованих в даній роботі. Так, буде показано, що стосовно до класу простого навантаження тензорні моделі вироджуються в скалярні. Моделі спадкового типу на відміну від переважної більшості інших моделей відображують "заліковування" пошкоджень в паузах та ряд інших ефектів.

Отже згідно наведеної класифікації процеси навантаження можуть бути стаціонарними ($\sigma_{ij}(t) = const$) і нестаціонарними ($\sigma_{ij}(t) \neq const$), ізотермічними ($T(t) = const$) та неізотермічними. Нестаціонарні процеси в свою чергу підрозділяються на клас простих навантажень ($\beta_{ij}(t) = const$) і клас складних навантажень ($\beta_{ij}(t) \neq const$).

На закінчення відзначимо, що за означенням Л.І. Седова пропорційне навантаження може бути тільки ізотермічним. З позицій механіки пошкоджень таке змішування недоцільне.

1.2 Класифікація процесів деформування

Широко відомо означення монотонної деформації, що сформульовано Г.О. Смирновим-Аляєвим [273]. Деформація матеріальної частинки називається монотонною, якщо виконуються наступні дві умови: а) головні осі швидкостей деформацій співпадають з одними й тими самими матеріальними волокнами макрочастинки; б) відношення головних компонент швидкості деформації залишаються незмінними на протязі процесу деформації. Умови деформування, близькі до монотонного [109] відрізняються від наведених вище тим, що допускається поворот головних напрямлень швидкостей деформацій відносно матеріальних волокон на кут, менший за $\pi/2$. Наведених та інших відомих означень [87,93,250,265,277] недостатньо для повного опису та поділу традиційних дослідів [18,25,39,42, 63+68,78,90, 96, 98,108, 110,114,123,148,175+177,207,208,225,226, 259,261,262,299] по пластичному деформуванню до руйнування.

Для заповнення зазначених прогалин пропонується наступна класифікація.

1. Стаціонарним гарячим деформуванням макрочастинки будемо називати процес, що відбувається за умови сталості компонент тензора швидкостей деформацій $\mathfrak{g}_{ij}(t)$ і показника η :

$$\mathfrak{g}_{ij}(t) = \mathfrak{g}_{ij}^{(0)} = const, \quad (1.6)$$

$$\eta(t) = \eta^{(0)} = const \quad (1.7)$$

Прикладами даних процесів є розтяг, стиск або кручення із сталою швидкістю деформацій, спільний розтяг з крученням при сталому відношенні швидкості деформації зсуву до швидкості видовження і незмінної величини інтенсивності швидкостей деформацій і т.д.

2. Якщо умова (1.6) виконується, а (1.7) не виконується, то такий процес будемо називати квазістаціонарним гарячим деформуванням.

3. Подібно до означення О.А. Ільюшина [87] гаряче деформування будемо називати простим, якщо напрямний тензор швидкостей деформацій β_{ij} і показник η не залежать від часу. В даному випадку виконуються умови (1.7) та умова

$$\beta_{ij}(t) = \beta_{ij}^{(0)} = const \quad (1.8)$$

При простому гарячому деформуванні інтенсивність швидкостей деформацій може змінюватися довільним чином

$$\mathfrak{g}_u = \mathfrak{g}_u(t) \quad (1.9)$$

4. Квазіпросте гаряче деформування маємо, коли виконується тільки умова (1.8). В цьому випадку величини \mathfrak{g}_u , η змінюються в процесі деформації довільним чином.

Для класів процесів деформування 2-4 доцільно ввести ознаку монотонності в залежності від характеру зміни функцій $\mathfrak{g}_u(t)$, та $\eta(t)$.

4.1. Квазіпросте ступеневе деформування з паузами - квазіпросте гаряче деформування при якому інтенсивність швидкостей деформацій \mathfrak{g}_u та показник η змінюються дискретно і можуть приймати одночасно на скінченних відрізках часу нульові значення.

4.2 Квазіпросте багатоступеневе гаряче деформування (без пауз) - квазіпросте гаряче деформування, при якому інтенсивність швидкостей деформацій \mathfrak{g}_u та показник η змінюються дискретно і не можуть приймати одночасно нульові значення на скінченних відрізках часу.

Аналогічно визначається і просте багатоступеневе гаряче деформування з паузами та без пауз.

5. Гаряче деформування при якому $\beta_{ij}(t) \neq \text{const}$ називається складним.

5.1. Якщо в процесі деформування величини β_{ij} , \mathfrak{g}_u , η змінюються дискретно, маємо багатоетапне гаряче деформування (з паузами або без пауз - за аналогією із ступеневим гарячим деформуванням).

Очевидно, що в межах етапа або ступені деформування є стаціонарним. Причому ступеневе гаряче деформування є окремим випадком багатоетапного при якому $\beta_{ij}(t) = \text{const}$.

Для процесів холодного деформування характерно відсутність залежності механічних властивостей матеріалу від швидкості деформації (для діапазоне швидкостей деформацій статичного деформування). Тому в даному випадку класифікація здійснюється простіше.

1. Стаціонарне або просте деформування $\beta_{ij}(\mathfrak{g}_u)$, $\eta(\mathfrak{g}_u)$, $\mu_\sigma = \text{const}$ (β_{ij} напрямний тензор приростів деформацій). Тут замість часу в якості характеристики стадії процесу деформування використовується накопичена деформація \mathfrak{g}_u [208].

2. Квазістаціонарне або квазіпросте деформування - $\beta_{ij}(\mathfrak{g}_u)$, $\eta = \text{const}$, $\eta(\mathfrak{g}_u) \neq \text{const}$.

3. Складне деформування - $\beta_{ij}(\mathfrak{g}_u) \neq \text{const}$.

3.1. Багатоетапне деформування - величини β_{ij} , η , μ_σ змінюються дискретно.

3.1.1. Циклічне деформування - циклічне повторення деякої комбінації двоетапного, триетапного або багатоетапного деформування.

Перше ніж перейти до аналізу конкретних моделей накопичення пошкоджень зробимо спробу класифікації таких моделей.

1.3. Класифікація та аналіз моделей накопичення пошкоджень

В літературі запропоновано велику кількість моделей накопичення пошкоджень, або як їх ще називають - кінетичних рівнянь пошкоджень. Для аналізу таких моделей пропонується наступна класифікація.

1. По типу підходу, що використовується при моделюванні.

1.1. Детерміністські моделі. 1.2. Імовірнісні моделі.

2. По типу розв'язуваних задач.

2.1. Стаціонарні ізотермічні процеси. 2.2. Нестационарні ізотермічні процеси. 2.3. Стаціонарні неізотермічні процеси. 2.4. Нестационарні неізотермічні процеси.

3. По виду розглядуваного напруженого стану.

3.1. Лінійний напружений стан. 3.2. Складний плоский напружений стан.

- 3.3. Об'ємний напружений стан.
- 4. По типу математичного об'єкту, що приймається для опису пошкодженості макрочастинки.
 - 4.1. Скалярні моделі. 4.2. Векторні моделі. 4.3. Тензорні моделі.
- 5. По області застосування.
 - 5.1 Процеси повзучості - теорія тривалої міцності.
 - 5.2 Пластичне деформування - теорія деформівності.
 - 5.2.1 Холодне деформування.
 - 5.2.2 Гаряче деформування.
 - 5.3. Малоциклова втома. 5.4. Багатоциклова, втома. 5.5. Змішані процеси (наприклад одночасне проходження повзучості і пластичного деформування).
- 6. По умовам навантаження.
 - 6.1. Статичне навантаження. 6.2. Динамічне навантаження.
 - 6.3 Імпульсне навантаження.
- 7. По типу визначальних величин.
 - 7.1. Силкові моделі. 7.2. Деформаційні моделі. 7.3. Змішані моделі.
- 8. По типу вихідних рівнянь.
 - 8.1. Скінченні критеріальні залежності. 8.2. Диференціальні рівняння.
 - 8.3. Моделі, що подані у вигляді функціоналів.
- 9. По типу вислідних рівнянь, що пов'язують величини, які визначаються в експерименті.
 - 9.1 Явні скінченні критеріальні залежності.
 - 9.2 Неявні скінченні критеріальні залежності.
 - 9.3. Рівняння, в яких зазначені залежності знаходяться за допомогою чисельних методів інтегрування і розв'язання диференціальних рівнянь.
- 10. По типу закона підсумовування, що покладений в основу моделі.
 - 10.1 Лінійний закон підсумовування.
 - 10.2 Нелінійний закон підсумовування.

Наведена класифікація не претендує на вичерпну повноту, а розподілення моделей по відповідним ознакам не может бути абсолютно точним та однозначним. При розробці класифікації увага акцентувалась не на можливих підходах до моделювання, а на конкретних моделях, що опубліковані в літературі.

В ряді випадків різниця між ознаками не мав принципового значення. Так, наприклад, якщо перехід від диференціального рівняння до інтегрального представлення тривіальний, то поділ на ознаки 8.2. або 8.3. досить умовний. Деякі моделі накопичення пошкодженості в теорії деформівності, яким належить надати ознаку 5.2. описують і малоциклову втому при жорсткому симетричному навантаженні.

Розроблена класифікація моделей накопичення пошкоджень істотно полегшує висвітлення та аналіз стану питання моделювання руйнування матеріалів.

Коло розв'язуємих в даній роботі задач обмежується статичними ізотермічними навантаженнями, зовсім не торкається багатоциклова втома. Це дозволяє виключити із розгляду моделі, що мають будь-яку із ознак 2.3, 2.4., 5-4., 6.2. та 6.3. Не розглядаються також імовірнісні підходи до моделювання, тому всі моделі що аналізуються тут мають ознаку 1.1.

В рамках наведеної класифікації можна указати основні ознаки моделей, що пропонуються в цій роботі.

Розробляється три типа моделей для опису тривалої міцності (5 -1.), холодного та гарячого деформування (5.2.). Ці моделі об'єднує однотипність прийнятих вихідних положень, наслідком чого з'являється спільність математичного апарату всіх трьох типів моделей.

Всі моделі мають ознаки 1.1., 2.2., 4•3., 8.3 •, 9.1. та 9.2., . 10.2. Моделі тривалої міцності мають ознаку 7.1., моделі граничних деформацій - ознаку 7.3.

Таким чином розроблена класифікація дозволила окреслити в першому наближенні межі застосування розроблюємих моделей.

Основна мета цієї роботи - викласти один із підходів до знаходження оцінок тривалої міцності або граничної деформації матеріалів при нестационарному навантаженні або деформуванні. Роботи, в яких досліджується руйнування матеріалів в стаціонарних процесах тут буде зачеплено лише в тій мірі, наскільки це виявиться необхідним для досягнення основної мети.

Сюди, зокрема, відносяться роботи, що розвивають концепцію Генки-Хоффа [5,6,51,94,140,141,250,323] та різні підходи для визначення температурно-часових залежностей тривалої міцності [6,9,104,122,129]. Характерним для цих робіт є ознаки 2.1. і 3.1.

Розробці критеріїв тривалої міцності присвячено напрям, що досліджує тривалу міцність матеріалів при стаціонарному навантаженні за умови складного напруженого стану. Фундаментальні результати в цьому напрямі отримано в роботах Г.С. Писаренко і А.О. Лвбедева [103,232,285]. Нові результати та інтерпретації відомих результатів запропоновано в [22,52,74,92, 135,143, 145,178+182,193,302]. Використання еквівалентного напруження дозволяє багато які результати, що відносяться до одноосьового напруженого стану, без великих зусиль перенести на випадок простого навантаження за умови складного напруженого стану. Приклади такого узагальнення наведено в [189,190].

В роботах [53,55,77,97,113,116,117 та ін.] розглядаються різні питання побудови моделей для тіл, що мають в початковому стані анізотропію тривалої міцності .

Аналіз опублікованих робіт по опису та прогнозуванню тривалої міцності матеріалів за умови нестационарного навантаження показує наступне.

Існує велика кількість робіт, у яких пропонуються різні підходи для опису найпростішого випадку нестационарного навантаження - двоступеневого навантаження [1,20,38,47,49,59, 76,83,100,101,134,136,145,189,190,201, 212,213,215, 217+219,305, 406, 308] та ін.]. Різко знижується число аналогічних підходів для опису багатоступеневого (не циклічного) навантаження, з числом ступеней близько $3 \div 20$. І зовсім одиничні критеріальні співвідношення отримано для опису ступеневих навантажень з паузами [1189,190,204]. Практично відсутні критеріальні співвідношення для опису особливостей тривалої міцності при складному навантаженні, зокрема при двохетапному та багатоступеневому навантаженнях. Слід підкреслити, що мова йде не про загальні представлення кінетичних рівнянь, а про критеріальні співвідношення, що впливають з цих рівнянь стосовно до зазначених класів навантаження.

В ряді робіт, в яких пропонуються моделі руйнування, відсутні скінченні критеріальні співвідношення і, як правило, обмежуються якісними висновками без співставлення з експериментальними даними [4,41,70,81,118,221,274+276].

Ще один вагомий недолік деяких відомих теорій полягав в тому, що через складність використання цих підходів, їх застосовують, як правило, тільки автори розробок. Це відноситься до робіт В.С. Бондаря [30+32], в деякій степені до робіт А.А. Мовчана [174+177] і до підходу, розвиненому В.О. Ліхачьовим та В.Г. Малініним [130].

Структурно-аналітичну теорію міцності В.О. Ліхачьова [130] відрізняє широчінь питань що охоплюються. В рамках цієї теорії прогноуються складні властивості пластичності і повзучості, накопичення пошкоджень та макроруйнування, ефекти пам'яті форми і пластичності перетворення, радіаційно-стимулюючої дифузії та багато інших. Нова концепція міцності розроблюється на основі об'єднання досягнень фізики міцності і пластичності та механіки деформівних середовищ. Природною платою є відсутність відносно простих вислідних співвідношень, що описують окремі класи навантажень.

А.А. Мовчаном [174+177] запропоновано кінетичні рівняння, що базуються на тензорному описі пошкожденості, які побудовано з урахуванням детального аналізу дислокаційного механізму руйнування. Але критеріальні залежності отримано [174,175,177] тільки для декількох окремих програм деформування, що ускладнює оцінку ефективності розроблених моделей и стримує широке їх використання.

Ще більш складний апарат розроблено в [32]. Тут пропонується узагальнену модель недружності замикаєти 25 (!) функціями, що підлягають експериментальному означенню та пропонується спосіб скорочення даних функцій до 13 (!).

Викладемо деякі міркування про підхід, в якому пропонується описувати процеси накопичення пошкоджень разом з деформаційними процесами на основі загальної системи рівнянь. При цьому еволюційні рівняння для параметра пошкоженості містять функції або функціонали, що моделюють залежності між напруженнями і деформаціями. Із сумісного розв'язання цих рівнянь визначаються як компоненти напружень і деформацій так і міра пошкоджень. Причому в якості обґрунтування такого підходу зустрічаються і висловлювання, які стверджують, що "Большинство уравнений накопления повреждений не связаны с уравнениями, описывающими поведение материала, и, следовательно, не учитывают влияния истории нагружения на процесс накопления повреждений" [30, с.122]. Але для врахування історії навантаження достатньо подати модель накопичення пошкоджень у вигляді функціонала і зовсім не обов'язково зв'язувати модель з рівняннями стану. Зазначимо, що введення параметра пошкоженості в рівняння зв'язку дозволило описати третю ділянку повзучості [250]. Введення в еволюційне рівняння для пошкоженості рівнянь зв'язку приводить до суттєвого ускладнення моделі. І обґрунтуванням такого ускладнення може бути поява нових можливостей щодо опису закономірностей руйнування. Взагалі такі моделі здаються малоперспективними для практичного використання.

Альтернативою складніш моделям в емпіричні співвідношення, що виражають різні закони підсумовування. Стислий огляд та аналіз найпростіших співвідношень такого типу подано в [1,285]. Такі співвідношення не універсальні і при зміні умов навантаження, для опису отримуваних результатів, необхідно конструювання нових співвідношень. Цей підхід особливо широкий розвиток отримав при дослідженні циклічних навантажень. В результаті отримана велика кількість співвідношень [61,105,184+186,216, 233,247,266, 267,280, 292,297], що описує той або інший клас циклічних навантажень.

Відчувається відсутність "прозорих" моделей, із яких випливають відносно прості критеріальні залежності, і в той же час такі, що враховують різні особливості складного навантаження. Відсутність таких моделей є суттєвим фактором, що стримує дослідження руйнування матеріалів за умови нестационарного навантаження. Поява відносно простих, адекватних існуючим дослідним даним, залежностей, що відображають особливості нестационарного, в тому числі - складного навантаження, стане стимулом і для постановки нових експериментальних досліджень.

Природно, що для опису особливостей напрямленого характеру накопичення пошкоджень, що залежить від напруженого і деформованого стану, доцільно побудова тензорних моделей.

Основні положення по створенню тензорної теорії накопичення пошкоджень сформульовано О.А. Ільющим [85,87] в 1967 году. В рамках

основних положень було побудовано лінійний варіант спадкової теорії тривалої міцності [85,87].

Заслуговує увагу наступний факт. Стаття О.А. Ільюшина по теорії тривалої міцності є одною з найбільш цитованих робіт з механіки пошкоджень. Причому пояснити це тільки авторитетністю автора не можна, оскільки в інші роботи О.А. Ільюшина, які не користуються такою популярністю. До цього ж можна додати, що не менш популярна монографія Л.М. Качанова [94], але рідко згадується робота цього ж автора [95], в якій викладено підхід до побудови моделі руйнування для опису складного навантаження. Все це свідчить про те, що інтерес, який виник у наукової громадськості до даної роботи, з'явився неспроста. Але з моменту появи даної теорії пройшло більше чверті століття. І за цей період не тільки не здійснювалися спроби розвинення тензорних властивостей моделі О.А. Ільюшина, але ці властивості не використовувались та навіть не були досліджені. Достатньо зазначити, що ніхто не звернув уваги на одну з найважливіших переваг тензорних моделей - властивість описати анізотропію тривалої міцності, що виникає в процесі повзучості початково ізотропних та анізотропних тіл.

Що ж стосується скалярних моделей спадкового типу, то тут отримано деякі результати, які, усе ж таки, носять фрагментарний характер [189,190,204,215].

Слід зазначити, що, як правило, необхідність тензорного подання пошкоженості сумнівів не викликає. Так, наприклад, в монографії відомих англійських спеціалістів [27, с. 253, 255] стверджується, "— что использованная выше скалярная мера поврежденности недостаточна - нужно ввести надлежащую тензорную характеристику". Але, на думку тих самих авторів "... определяющие соотношения, основанные на использовании тензорной меры поврежденности чрезвычайно сложно применить для решения практических задач".

Існують й інші думки. П.А. Павлов, який розвиває запропоновані О.А. Ільюшином скалярні моделі спадкового типу, вважає [215, с.84], що "ни теоретические рассуждения неизвестные экспериментальные данные не указывают на то, что введение тензора повреждений является обязательным".

Успіхи що досягнуто на шляху побудови тензорних моделей деформівності [65,66,167] дають основу очікувати і високої ефективності тензорних моделей тривалої міцності.

Незважаючи на те, що тензорні моделі деформівності побудовано на базі основних постулатів О.А. Ільюшина [85,87] методологія побудови цих моделей відрізняється від розвинутої О.А. Ільюшином для побудови моделі тривалої міцності. Для ефективного розвинення моделей накопичення пошкоджень, що

описують як процеси повзучості так і процеси пластичного деформування, необхідно установити взаємозв'язок зазначених підходів до побудови моделей.

В ряді робіт досліджується стаціонарне деформування. Так на основі теоретичних посилок В.М. Сегалом [263] отримано умову

$$2/\mathfrak{g}_{*к} = 1/\mathfrak{g}_{*с} + 1/\mathfrak{g}_{*р} \quad (1.10)$$

що добре узгоджується з експериментальними даними [108]. Тут $\mathfrak{g}_{*с}$, $\mathfrak{g}_{*к}$, $\mathfrak{g}_{*р}$ - накопичена деформація до руйнування при стаціонарному деформуванні за умови стиску, кручення і розтягу відповідно.

Виявлена закономірність, згідно якої $\mathfrak{g}_{*к}$ визначається, як середнє гармонічне величин $\mathfrak{g}_{*с}$ та $\mathfrak{g}_{*р}$ перевірена на п'ятнадцяти матеріалах [263], і в багатьох випадках дозволяв скоротити об'єм експериментів для побудови діаграм пластичності.

Авторами [96] розроблено модель в'язкого руйнування, що базується на концепції втрати несучої властивості структурного елемента матеріалу і враховує одночасне зростання та ініціацію пор в процесі пластичного деформування. На основі розвинутої моделі отримано апроксимації діаграми пластичності $\mathfrak{g}_{*с} = \mathfrak{g}_{*с}(\eta)$ для молібдена і сталі 15Х2МФА. Тут же розглядається двоступеневе та чотириступеневе просте деформування, але відповідні критеріальні залежності відсутні. М.А. Рвачовим [257,295] сформульовано дві гіпотези:

1. Основним параметром напруженого стану, що впливав на процес розвинення-заліковування дефектів металу, в нормальна складова тиску P на площинці, на якій зсувна деформація максимальна.

2. Швидкість процесу розвинення-заліковування дефектів належить від кількості дефектів, що накопичено в матеріалі.

Зазначені передпосилки зводять модель до диференціального рівняння першого порядку

$$d\psi = F(P, \psi) \cdot d\mathfrak{g}_u, \quad (1.11)$$

окремим випадком якого в лінійне диференціальне рівняння

$$d\psi = (\psi \cdot f(P(\mathfrak{g}_u) + g) \cdot d\mathfrak{g}_u, \quad (1.12)$$

де $f[P]$ та g - функція і константа, що характеризують властивості матеріалу.

В [257] зазначається, що істотною відмінною моделі (1.12) від інших полягає в тому, що швидкість зміни пошкодженості залежить від рівня пошкодженості ψ , а не тільки від характеристик напружено-деформівного стану матеріалу. Причому зазначається [257], що в цьому розумінні модель є нелінійною.

Але істотність зазначеної відміни сумнівна. Для доведення цього подамо модель накопичення пошкоджень за аналогією з (1.11) у вигляді

$$d\psi = F(I, T, \psi) \cdot dt, \quad (1.13)$$

де t - час, I - сукупність розмірних та безрозмірних інваріантів напружено-деформівного стану; T - температура.

Розглянемо окремий випадок, коли (1.13) є диференціальним рівнянням з відокремлюваними змінними

$$d\psi = \varphi[I(t), T(t)] \cdot f(\psi) \cdot dt. \quad (1.14)$$

Відокремлюючи змінні та інтегруючи, дістанемо

$$\int_{\psi(0)}^{\psi(t)} \frac{d\psi}{f(\psi)} = \int_0^t \varphi[I(t), T(t)] \cdot dt, \quad (1.15)$$

де $0 \leq \psi(0) < 1$ - початкова пошкодженість.

В момент руйнування $t = t_*$ маємо $\psi = \psi_* = 1$, тоді

$$\frac{1}{A} \cdot \int_0^{t_*} \varphi[I(t), T(t)] \cdot dt = 1, \quad (1.16)$$

де

$$A = \int_{\psi(0)}^1 \frac{d\psi}{f(\psi)}.$$

Стосовно до ізотермічного стаціонарного гарячого деформування із (1.16) впливає рівність

$$\varphi[I, T] \cdot \frac{t_{*c}}{A} = 1, \quad (1.17)$$

з урахуванням якої (1.16) приймає вигляд інтеграла Бейлі

$$\int_0^{t_*} \frac{dt}{t_{*c} \varphi[I(t), T(t)]} = 1, \quad (1.18)$$

що виражає принцип лінійного підсумовування пошкоджень.

Отже, припустивши, що швидкість накопичення пошкоджень залежить від досягнутого рівня пошкодженості, ми отримали тривіальний результат.

Розв'язанням рівняння (1.12) дістанемо

$$\begin{aligned} \psi(\bar{g}_u) = \exp \left(\int_0^{\bar{g}_u} f[P(\bar{g}_u)] \cdot d\bar{g}_u \right) \times \\ \times \left[g \cdot \int_0^{\bar{g}_u} \exp \left(- \int_0^{\bar{g}_u} f[P(\bar{g}_u^*)] \cdot d\bar{g}_u^* \right) \cdot d\bar{g}_u + \psi(0) \right], \end{aligned} \quad (1.19)$$

де $0 \leq \psi(0) < 1$.

При ізобаричних випробуваннях за умови кручення зразків в камері високого тиску маємо $P = -q = \text{const}$ (q - тиск в камері). З урахуванням записаної умови вираження (1.19) спрощується

$$\Psi(\bar{g}_u) = \exp(f(P) \cdot \bar{g}_u) \times \{g \cdot [1 - \exp(-f(P) \cdot \bar{g}_u)] / f(P) + \varphi(0)\}, \quad (1.20)$$

звідки при $\bar{g}_u = \bar{g}_*(P)$ з урахуванням $\psi(\bar{g}_*) = 1$ дістанемо

$$g = f(P) \cdot \frac{\exp[-f(P) \cdot g_*(P)] - \psi(0)}{1 - \exp[-f(P) \cdot g_*(P)]}. \quad (1.21)$$

Тоді вираз (1.20) приймає вигляд

$$\psi(g_u) = \frac{\exp[f(P) \cdot g_u] - 1}{\exp[f(P) \cdot g_*(P)] - 1} + \frac{1 - \exp[-f(P) \cdot (g_*(P) - g_u)]}{1 - \exp[-f(P) \cdot g_*(P)]} \cdot \psi(0). \quad (1.22)$$

Підхід, що запропоновано в [257] мав дві основні відміни від методології побудови моделей, що звичайно використовується в теорії деформівності [25,108,207,208,234]. Із моделі (1.12) випливає апроксимація залежності граничної деформації g_* від параметра P для процесів, у яких $P = \text{const}$. Дійсно, розв'язавши (1.21) відносно g_* , дістанемо вираз, що наведений в [257]

$$g_*(P) = \frac{1}{f(P)} \cdot \ln \frac{f(P) + g}{f(P) \cdot \psi(0) + g}, \quad (1.23)$$

і який з точністю до вибору функції $f(P)$ апроксимує вказану залежність.

Якщо в представленні (1.12) замість $f(P)$ записати $f(\eta)$, тобто

$$d\psi = [\psi \cdot f(\eta(g_u)) + g] \cdot dg_u, \quad (1.24)$$

то розглядаючи процеси-, в яких $p = \text{const}$, дістанемо апроксимацію діаграми пластичності

$$g_{*c}(\eta) = \frac{1}{f(\eta)} \cdot \ln \frac{f(\eta) + g}{f(\eta) \cdot \psi(0) + g}. \quad (1.25)$$

Отриманий вираз не описує відомих дослідних даних по сумісному розтягу з крученням зразків в камері високого тиску ($P + M + q$ - досліди). Але, якщо прийняти $f=f(\eta, \mu_\delta)$, то такий опис стає можливим. І в цьому розумінні показник P в (1.23) має перевагу перед показником η . Але використання показника P (друга відміна) спряжено і з цілим рядом незручностей. При найпростіших випробовуваннях за умови розтягу або стиску показник P не є сталою, а його зміна з ростом деформації визначається кривою текучості матеріалу. При дослідженні на кручення за умови стаціонарного навантаження (досліди на тривалу міцність) $P = 0$ незалежно від величини інтенсивності напружень. Це значить, що згідно (1.23), величина необоротної деформації до руйнування за умови повзучості незмінна, незалежно від величини прикладеного крутного моменту. Це вимагає експериментального підтвердження.

Якщо в (1.12) g як і f є функцією η , то, згідно (1.25), із лінійної залежності функцій f та g випливає лінійна залежність f та g . До того ж остання умова є

необхідною та достатньою для здобуття, на основі диференціального рівняння (1.12), лінійного принципу підсумовування пошкоджень.

Отже структура виразу (1.12) не має нічого специфічного, крім можливості здобуття інтегрального представлення (1.19). Саме ця, по суті, формальна властивість в сполученні з прагненням до простих вихідних представлень і може послужити обґрунтуванням прийнятих співвідношень. Побудова та дослідження моделей, що базуються на представленні (1.12) та інших найпростіших диференціальних рівнянь є беззаперечно цікавою. Зауважимо, що робота [257] по рівню, логіці, стилю та доступності викладення може бути віднесена до найкращих робіт подібного роду. Але, наскільки відомо, підхід, що викладено в [257] не отримав подальшого розвинення.

Найбільше розвинення та застосування для аналізу руйнування в процесах обробки матеріалів тиском отримала теорія деформівності. Першу модель накопичення пошкоджень у вигляді функціонала в рамках даного підходу запропонував В.Л. Колмогоров [108]

$$\psi(t) = \int_0^t E(t - \tau) \cdot \frac{\mathfrak{g}_u(t)}{\mathfrak{g}_{*c}[\eta(\tau)]} \cdot d\tau, \quad (1.26)$$

де ψ - характеризує міру пошкоженості матеріалу та змінюється від 0 в початковому стані до 1 при вичерпанні ресурсу пластичності, тобто в момент руйнування; t, τ - час; $E(t - \tau)$ - коефіцієнт, що враховує самозаліковування дефектів при високій температурі; V - коефіцієнт, що враховує історію деформування; $\mathfrak{g}_{*c}(\eta)$ - діаграма пластичності.

Але не було запропоновано ніяких відомостей про визначення Функцій V і E , тому на практиці велике розповсюдження отримала найпростіша модель В.Л. Колмогорова

$$\psi(\mathfrak{g}_u) = \int_0^{\mathfrak{g}_u} \frac{d\mathfrak{g}_u^*}{\mathfrak{g}_{*c}[\eta(\tau)]}$$

де \mathfrak{g}_u - накопичена деформація.

Представлення (1.27) в аналогом інтеграла Бейлі. Але для проведення подібної аналогії потрібно було залучити представлення про діаграму пластичності. Формуванню поняття про діаграму пластичності в значній мірі сприяли роботи С.І. Губкіна, Л.Д. Ипколова, Г.О. Смирнова-Аляєва [272,273].

Тут доречно стисло подати історію розвинення підходу, що дозволяє прогнозувати руйнування в нестационарних процесах на основі даних по руйнуванню при стаціонарному навантаженні. Перше таке розв'язання пов'язують з ім'ям Пальмгрена, який в 1924 г. сформулював принцип лінійного підсумовування пошкоджень [325]. В '1945 г. Майнер [324] пропонує логічне обґрунтування принципу лінійного підсумовування. Тому гіпотезу лінійного

підсумовування пошкоджень називають іноді гіпотезою Пальмгрена-Майнера [49]. Узагальнення даної гіпотези на випадок неперервної зміни параметрів навантаження пропонується Бейлі [322] в 1939 г. До процесів повзучості принцип лінійного підсумовування було застосовано вперше Робінсоном [326] в 1952 г., а до процесів пластичного деформування - В.Л. Колмогоровим [108] в 1970 г.

В подальшому розвинення даного підходу до прогнозування руйнування при пластичному деформуванні здійснювалось в декількох напрямках.

Перший напрямок був присвячений експериментальному дослідженню та аналітичній інтерпретації залежності накопиченої деформації до руйнування за умови ізотермічного стаціонарного деформування від інваріантів напруженого стану, температури, градієнта деформації, швидкості деформацій та інших величин [25, 39, 67, 69, 108, 121, 207, 208, 222, 234, 295].

До другого напрямку слід віднести експериментальне дослідження закономірностей зміни, накопиченої . деформації до руйнування за умови нестационарних холодного та гарячого деформування [25, 39, 42, 62+69, 90, 148, 207, 208, 225, 226, 234, 240, 259, 295].

Третій напрямок присвячено розробці моделей накопичення пошкоджень. Ці моделі частіше за все називають критеріями деформівності [24, 32, 60, 65+68, 74, 98, 110, 120, 121, 207, 208, 222, 234, 295]. Головна мета даного підходу до моделювання руйнування полягає в здобутті оцінок накопиченої деформації до руйнування в нестационарних процесах на основі даних, що отримано при стаціонарному, деформуванні. Зміст даного підходу визначає взаємозв'язок всіх трьох напрямків. Зниження інтенсивності розвинення одного із напрямків автоматично стримує розвинення інших напрямків.

Багато із накопичених ' до середини 70-х років експериментальних даних не вміщуються в рамки лінійного принципу (1.27). Цим було викликана поява нелінійної моделі [66, 68, 207, 208]

$$\Psi(\mathfrak{g}_u) = \int_0^{\mathfrak{g}_u} n \cdot \frac{\mathfrak{g}_u^{n-1}}{\mathfrak{g}_{*c}^n [\eta(\mathfrak{g}_u)]} \cdot d\mathfrak{g}_u, \quad (1.28)$$

де $n = 1 + 0,2 \cdot \arctg(d\eta/d\mathfrak{g}_u)$ - було визначено за результатами випробовувань за умови спільного кручення та розтягу суцільних циліндричних зразків.

Але стосовно до процесів двохетапного та багатоетапного деформування ($d\eta/d\mathfrak{g}_u = 0$) модель (1.28) стає тотожною моделі (1.27).

Для опису результатів двохетапного деформування розтяг - кручення, багатоетапного деформування за умови знакозмінного кручення та інших результатів 0.0. Богатов запропонував модель у вигляді [24]

$$\psi(\mathfrak{g}_u) = \sum_{i=1}^k \int_0^{\Delta \mathfrak{g}_u^{(i)}} n \cdot \frac{\mathfrak{g}_u^{n-1}}{\mathfrak{g}_{*c}^n[\eta(\mathfrak{g}_u)]} \cdot d\mathfrak{g}_u$$

де $\mathfrak{g}_u^{(i)}$ - величина деформації на i - ому етапі; k – кількість етапів.

Але можливості моделі (1.29) в плані опису та прогнозування руйнування при нестационарному деформуванні досить обмежені. Наприклад, згідно моделі сума $\psi_1 + \psi_{*2}$ ($\psi_1 = \frac{\Delta \mathfrak{g}_u^{(1)}}{\mathfrak{g}_{*1}}$; $\psi_{*2} = \frac{\mathfrak{g}_{*2} - \Delta \mathfrak{g}_u^{(1)}}{\mathfrak{g}_{*2}}$; \mathfrak{g}_{*} - величина накопиченої деформації до руйнування при двохетапному деформуванні; \mathfrak{g}_{*i} ($i=1,2$) - деформація по діаграмі пластичності, що відповідає значенню показника η) не залежить від черговості прикладення осьової сили та крутного моменту, що суперечить експериментальним даним [2,62,65,66].

Принципово новий етап в побудові моделей руйнування відкривається з появою робіт Г.Д. Деля [65,66] та І.А. Кийко [98], в яких запропоновано варіанти тензорних моделей.

В рамках загальних положень про побудову тензорної теорії руйнування, що сформульовані О.А. Ільюшиним [85,87], Г.Д. Дель визначив компоненти тензора-девіатора наступним чином

$$\psi_{ij}(\mathfrak{g}_u) = \int_0^{\mathfrak{g}_u} F(\mathfrak{g}_u, \eta, \mu_\sigma) \cdot \beta_{ij} \cdot d\mathfrak{g}_u, \quad (1.30)$$

де μ_σ - параметр Лоде; β_{ij} - напрямний тензор приростів деформацій, що визначається рівністю

$$\beta_{ij} = d\mathfrak{g}_{ij} / \sqrt{(d\mathfrak{g}_{ij} \cdot d\mathfrak{g}_{ij})} \quad (1.31)$$

де $d\mathfrak{g}_{ij}$ прирости пластичних деформацій.

Умову руйнування прийнято у вигляді

$$\psi_{ij} \cdot \psi_{ij} = 1, \quad (1.32)$$

в якості підінтегральної функції в (1.30) запропоновано вираз

$$F = \frac{1}{\mathfrak{g}_{*c}(\eta)} \cdot \left(1 - a + 2 \cdot a \cdot \frac{\mathfrak{g}_u}{\mathfrak{g}_{*c}(\eta)} \right). \quad (1.33)$$

В рамках запропонованої моделі Г.Д. Делем розв'язано задачі двохетапного деформування, окремі випадки циклічного, складного деформування та розглянуто, деякі інші питання. У співставленні з різноманітними експериментальними даними продемонстровано беззаперечні переваги тензорної моделі.

В [167,168] запропоновано узагальнюючу (1.30) тензорно - нелінійну модель, що дозволила описати деякі ефекти, які не вміщуються в рамки тензорно-лінійної моделі. Розв'язано задачу багатоетапного деформування, дано уточнене розв'язання задачі циклічного деформування, здійснено аналіз кувальної операції протягання, розглянуто ряд інших задач.

Безперечним достоїнством роботи [98, с.31] є введення гіпотези 3: "Експерименти по разрушению образцов, нагружаемых в условиях простой деформации и изменяющихся параметров процесса T, η, \mathfrak{B}_u , описываются критериями исчерпания пластичности типа

$$\int_0^{t_*} \frac{\mathfrak{B}_u(\tau) \cdot d\tau}{\mathfrak{B}_{*c}[T(\tau), \eta(\tau), \mathfrak{B}_u(\tau)]} = 1, \quad (1.34)$$

где t_* - момент разрушения. Цитата приведена з точністю до позначень величин.

Але в подальшому при побудові моделі не тільки фактично на використовуються переваги, що породжуються даною гіпотезою, але більш того, побудована модель суперечить даній гіпотезі. Це легко бачити із порівняння співвідношення (1.34) з співвідношенням, що наведено в [98] під номером (2.6):

$$P_1 = \left(\frac{\mathfrak{B}_u^{(1)}}{a_1} \right)^{\alpha_1} \cdot \int_0^t \frac{(t - \tau)^{\alpha_1} \cdot d\mathfrak{B}_1(\tau)}{\mathfrak{B}_u^{(1)}}, \quad (1.35)$$

де \mathfrak{B}_1 - компонента вектора швидкості деформації, a_1, α_1 - деякі сталі. Співвідношення (1.35) отримано за припущенням про незалежність граничної деформації від температури T і показника η , тобто по суті стосовно до простого ізотермічного деформування.

В [98] використовується векторне представлення тензора. Таке представлення відіграло важливу роль для побудови теорії пластичності, але менш ефективно для побудови, теорії руйнування. Це пов'язано з тим, що величина накопиченої деформації до руйнування істотним чином залежить від вигляду напруженого стану. Для границі текучості цією залежністю нерідко можна знехтувати.

Таким чином, в роботі [98] висунуто ряд цінних положень, які, все-таки, в повній мірі не реалізовано. Більш плідним здається підхід, що запропоновано Г.Д. Делем та розвинуто в [167,168].

Але наявні моделі не відображають особливостей високотемпературної деформації, що пов'язані з частковим еамозаліковуванням пошкодженості. Не здійснювалися спроби побудови тензорних моделей для тіл, що мають

початкову анізотропію граничних деформацій. Відомі результати Л.Ю. Басовського [16] є узагальненням скалярних моделей на випадок початкової анізотропії.

Розроблені моделі не описують всіх експериментально виявлених ефектів зміни граничних деформацій при двохетапному деформуванні [66]. В зв'язку з цим перспективним здається розв'язання задачі врахування в мірі пошкоджень третього інваріанта девіатора пошкоджень.

...

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Або эль Ата М., Финни И. Исследование законов суммирования повреждений при ползучести // Теор. Основы инж. расчётов.- 1972. - N3. - С. 1-32.
2. Анализ деформируемости металлов при поверхностном упрочнении сталей / В.А. Матвийчук, В.П. Егоров, В.М. Михалевич, В.Д. Покрас // Кузнечно-штамповочное производство. - 1993. - N10. - С. 10-13.
3. Анизотропия свойств пористых порошковых материалов при одноосном сжатии / П. А. Витязь, В. К. Шелег, В.М. Капцевич и др.// Порошковая металлургия. - 1986. - N8. - С. 81-85.
4. Аптуков В.Н. Об энергетических условиях образования сферических микродефектов в упруго-пластической среде // В сб.: Деформирование и разрушение композитов. - Свердловск, 1985. - С. 61-67.
5. Арутюнян Р. А. О разрушении в условиях ползучести //Пробл. прочности. - 1984. - N 6. - С. 7-9.
6. Арутюнян Р. А. О хрупком разрушении в условиях ползучести // Пробл. прочности. -1986. - N 11. - С. 30-32.
7. Арутюнян Н.Х., Зевин А.А. Расчет строительных конструкций с учетом ползучести. - М.: Стройиздат, 1988. - 256 с.
8. Аршакуни А.Л. Обобщённая кинетическая модель ползучести и длительной прочности металлов в условиях смешанного характера процесса ползучести. Сообщение 2. Предельный случай // Пробл. прочности. - 1990. - N 4. -С. 55-59.
9. Аршакуни А.Л., Чередеева Л.В. К выбору определяющих соотношений длительной прочности металлов // Пробл. прочности. - 1990. - N 5, - С. 26-30.
10. Астафьев В.И. К вопросу о повреждённости и критериях разрушения при ползучести // Пробл. прочности. - 1983. -N3. -С. 11-13.
11. Астафьев В.И. Описание процесса разрушения в условиях ползучести // Изв. АН СССР. Механика твёрдого тела. - 1986. - N 4. - С. 164-169.
12. Ахундов М.Б. Механизм деформирования и рассеянного разрушения в условиях ползучести // Изв. АН СССР. Механика твёрдого тела. - 1991. - N 4. -С. 173-179.
13. Ашкенази Е.К., Ганов Э.В. Анизотропия конструкционных материалов: Справочник. – Л.: Машиностроение, 1980 - 247 с.
14. Балан Т.А., Вариант критерия прочности структурно-неоднородных материалов при сложнапряжённом состоянии // Пробл. прочности - 1986. -N2. -С. 21-26.
15. Баренблатт Г.И., Ботвина Л.Р. Автомодельность усталостного разрушения. Накопление повреждаемости // Изв. АН СССР Механика твёрдого тела. - 1983. - N 4. - С. 161-165.

16. Басовский Л.Е. Анизотропия рассеянного разрушения при пластическом течении сталей и сплавов // Изв. вузов. Машиностроение. - 1989. - N 2 -С. 102-105.
17. Басовский Л.Е. Влияние вида напряжённого состояния и немонотонности деформирования на использование запаса пластичности при обработке давлением // Изв. вузов. Машиностроение. - 1989. - N 5. - С. 101-104.
18. Басовский Л.Е. Прогнозирование повреждённости деформируемых материалов при немонотонном нагружении // Изв. вузов. Машиностроение. -1988.-N2.-С. 3-7.
19. Березина Т.Г. Исследование закономерностей развития разрушения при ползучести теплоустойчивых сталей // Пробл. прочности. - 1985. - N 8. -С. 48-52.
20. Бернард-Конноли, Бью-Куок, Бирон. Усталость коррозионно-стойкой стали 304 при испытаниях в условиях многоступенчатой контролируемой деформации // Теор. основы инж. расчетов. - 1983. т. 105. - N 3. - С. 47-53.
21. Биргер И.А. Детерминированные и статистические модели суммирования повреждений // Пробл. прочности. - 1978. -N 11. -С, 3-11.
22. Биргер И.А. Об одном критерии разрушения и пластичности // Изв. АН СССР. Механика твёрдого тела - 1977. - N 4. - С. 143-150.
23. Бобырь Н.И., Мукоида О.Н. Долговечность конструкционных материалов при сложном малоцикловом нагружении // Пробл. прочности. - 1991. -N 3. - С. 3-9.
24. Богатов А.А. Теория разрушения металлов при обработке давлением // В сб.: Обработка металлов давлением. - Свердловск, 1982. - С. 15-22.
25. Богатов А.А., Мижирицкий О.И., Смирнов С.В. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением. -М.: Металлургия. 1984. -144 с,
26. Богданофф Дж., Козин Ф. Вероятностные модели накопления повреждений. - М.: Мир, 1989 - 344 с.
27. Бойл Дж., Спенс Дж. Анализ напряжений в конструкциях при ползучести - М.: Мир, 1976. - 360 с.
28. Болотин В.В. Методы теории вероятностей и теории надёжности в расчётах сооружений. - М.: Стройиздат, 1982 - 351 с.
29. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций.- М.: Машиностроение.1984,- 312 с.
30. Бондарь В.С. Прогнозирование долговечности материала при неупругом деформировании // В сб.: Расчёты на прочность, -М.: Машиностроение, 1987. - Вып. 28. -С. 122-126.
31. Бондарь В.С. Математическое моделирование процессов неупругого поведения и накопления повреждений материала при сложном неизотермическом нагружении в условиях ионизирующего излучения // В сб.: Расчёты на прочность. - М: Машиностроение, 1989, Вып. 29. - С. 23-29.
32. Бондарь В.С., Фролов А.Н. Математическое моделирование процессов неупругого поведения и накопления повреждений материала при сложном нагружении // Изв. АН СССР. Механика твёрдого тела. - 1990. - N 6 . - С. 99-107.
33. Бородин Н.А., Борщев Н.И. Экспериментальная оценка деформационного критерия длительной прочности // Пробл. прочности. - 1972. - N 1. -С. 22-26.
34. Бородин Н.А., Желябина Н.К. О распределении долговечности при

- многорежимных случайных циклических нагрузках // Пробл. прочности. -1984.- N 1.-С. 19-21.
35. Ботвина Л.Р., Баренблатт Г.И. Автомодельность накопления повреждаемости // Пробл. прочности. - 1985. - N 12. - С.17-24.
36. Бураченко В.А., Гойхман Б.Д. Интегродифференциальный критерий прочности стареющих полимеров // Пробл. прочности. - 1985. - N 8. - С. 88-91.
37. Бурлаков А.В., Львов Г.И., Морачковский О.К. Длительная прочность оболочек. - Харьков: Вища шк., 1981. - 104 с.
38. Буи-Куок Т. Инженерный подход к анализу накопления повреждений в металлах в условиях ползучести // Теор. основы инж. расчётов- 1979. - 101, N 4. - С. 33-40.
39. Важенцев Ю.Г., Исаев В.В. Оценка влияния истории нагружения на пластичность металлов // В сб.: Обработка металлов давлением. - Свердловск, 1982. - С. 23-27.
40. Вайцехович С.М., Михалевич В.М., Романихин М.В. Способ обработки материалов давлением. Патент Российской Федерации. 27.05.95. Бюл. N15 (Заявка N 4603720/08. Положит. решение от 20.03.1991
41. Вакуленко А.А., Крейнович В.Я. Физико-геометрическое исследование хрупкого разрушения при ползучести // Прикл. математика и механика. -1989. -53, N5. -С. 837-844.
42. Влияние горячей прерывистой деформации на пластичность металла / А.А. Богатов, М.В. Смирнов, В.А. Криницын и др. // Изв. вузов. Чёрная металлургия. - 1981. - N 12. - С. 37-40
43. Влияние циклических перегрузок на длительную прочность сплава для дисков ГТД / Е.Р. Голубовский, Г.П. Мельников, И.П. Булыгин и др. // Пробл. прочности. -1984. - N 6. - С. 10-14.
44. Ву Э.М., Феноменологические критерии разрушения анизотропных сред. - В кн.: Механика композиционных материалов. - М.: Мир, 1978 - т. 2. - С. 401-491.
45. Гаврилов Д.А., Пестриков В.М. Об определяющих соотношениях, описывающих изменение механических свойства стареющих вязкоупругих полимерных материалов // Прикл. механика. - 1992 - 28, N 6 - С 28-35.
46. Гениев Г.А., Курбатов А.С. Критерии прочности анизотропных материалов, учитывающие различные механизмы разрушения /'Пробл. прочности. - 1991. - N12. -С. 3-6.
47. Голуб В.П. Определяющие уравнения в нелинейной механике повреждённости // Прикл. Механика. - 1993. - 29, N 10. - 37- 49.
48. Голуб В.П., Пантелеев Е.А. Накопление повреждений и расчёт усталостной долговечности стержней при осевом нагружении // Пробл.прочности. - 1993. -N 4.: С. 3-12.
49. Голуб В.П., Погребняк А.Д., Романов А.В. О применимости гипотезы линейного суммирования в задачах ползучести и усталости //Пробл. прочности. - 1993. - N 10. - С. 20-29.
50. Голуб В.П., Романов А.В. К задаче построения нелинейных моделей накопления повреждений при ползучести // Пробл. прочности. - 1990. - N 6. - С. 9-14.
51. Голуб В.П., Тетерук Р.Г. К расчёту длительной прочности на основе модели вязкого разрушения Хоффа // Пробл. прочности. - 1993. - N 2. - С. 26-34.

52. Голубовский Е.Р. Длительная прочность и критерий разрушения при сложном напряжённом состоянии сплава ЭИ698ВД // Пробл. прочности. -1984.-N 8.-С. 11-17.

53. Голубовский Е.Р., Подъячев А.П. Оценка длительной прочности при сложном напряжённом состоянии никелевых сплавов с поликристаллической и монокристаллической структурой // Пробл, прочности. - 1991. - N 6. - С. 17-22.

54. Голубовский Е.Р, Трунин И.И. К вопросу о температурно-временной зависимости конструктивной длительной прочности // Пробл. прочности. -1978. - N 12. - С. 33-38.

55. Гольденблат И.И., Бажанов В.Л., Копнов В.А. Длительная прочность в машиностроении. - М: Машиностроение, 1977. - 248 с.

56. Гольдман А.Я. Прогнозирование деформационно-прочностных свойств полимерных и композиционных материалов. - Л.: Химия, 1988. – 272 с.

57. Гольдман А.Я., Деменчук Н.П., Мурзаханов Р.Г. Ползучесть полимерных материалов в условиях объёмного напряжённого состояния при программном нагружении // Пробл прочности. - 1984. - N 5. - С 31-37.

58. Гохфельд Д.А., Садаков О.С. Пластичность и ползучесть элементов конструкций при повторных нагружениях. - М: Машиностроение, 1984. – 256 с.

59. Гуляев В.Н., Колесниченко М.Г. К оценке долговечности в процессе ползучести при ступенчатом изменении нагрузки // Заводская лаборатория. - 1963. - XXIX. -N6 -С. 748-752.

60. Гун Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением. - М.: Металлургия, 1980. - 456 с.

61. Гусенков А.П., Котов П.И. Длительная и неизотермическая малоцикловая прочность элементов конструкций. - М.; Машиностроение, 1988. - 264 с.

62. Дегтярёв В. П. Деформации и разрушение в высоконапряжённых конструкциях. - М.: Машиностроение, 1987. - 105 с.

63. Дегтярёв В. П. О деформационных критериях разрушения при простых и сложных нагружениях // Пробл. прочности. -1972. - N 7, С. 22-25.

64. Дегтярёв В.П. Пластичность и ползучесть машиностроительных конструкций. - М.: Машиностроение, 1967. -131 с.

65. Дель Г.Д. Пластичность деформированного металла // В сб.: Физика и техника высоких давлений. - 1983. - N 11.- С.28-32.

66. Дель Г.Д. Пластичность при немонотонном деформировании. Воронеж, - 1982. - 10с. - Деп. в ВИНТИ 13.04.82, N 1813-82.

67. Дель Г.Д. Технологическая механика. - М.: Машиностроение, 1978. -174 с.

68. Дель Г.Д., Огородников В.А., Нахайчук В.Г. Критерий деформируемости металлов при обработке давлением // Изв. вузов Машиностроение. - 1975. - N 4. - С. 135-140.

69. Деформация металлов жидкостью высокого давления / В.И. Уральский, В.С. Плахотин, Н.И. Шефтель и др. - М.: Металлургия, 1976. - 424 с.

70. Дзюба В.С. Повреждаемость армированных пластиков при высокой

температуре// Пробл. прочности. - 1984. - N 7. - С. 36-40.

71. Дмитриев О.В. О возможности получения у металлов сверхпластических свойств при многократном обжатии // Вестник Московского ун-та, сер 1. Математика и механика. -1992, - N 3. - С.66-69.

72. Дряунов Б. А. Прикладная теория пластичности пористых тел. - М.: Машиностроение, 1989. -168 с.

73. Евстратов В.А. Теория обработки металлов давлением. - Харьков: Вища шк., 1981. -248 с.

74. Елсуфьев С.А. Предельное состояние тонкостенной трубы, деформируемой продольной силой, крутящим моментом и внутренним давлением // Пробл. прочности. - 1992, - N 7. – С. 59-63,

75. Ефимов В.Н., Зельцер И.С., Алиев И.С. Математическая модель разрушения дробно-деформированного в горячем состоянии металла // Изв. АН СССР. Металлы. - 1989. - N 6. – С. 129 -134.

76. Закономерности ползучести и длительной прочности: Справочник / Под общ. ред. С.А. Шестерикова. - М.: Машиностроение, 1983. - 101 с.

77. Захаров К.В. Длительная прочность анизотропных пластмасс в плоском напряжённом состоянии // Изв. АН СССР. Механика твёрдого тела. - 1969. - N6. - С. 108-111.

78. Золотухин П.И., Смирнов В.К., Харитонин С.В. Исследование пластичности титановых сплавов BT3-I и BT20 при температурах горячей обработки давлением // В сб.: Обработка металлов давлением. - Свердловск, 1987. - С. 46-50.

79. Зорин В.А. Основы долговечности строительных машин. М.: Машиностроение. 1986.- 248с.

80. Иванова Г.М., Малинин Н.И. О наследственной теории ползучести и малоциклового усталости полимерных материалов // Механика полимеров. -1970. -С. 615-621.

81. Игнатова Г.В., Сирин Ю.П., Ташкинов А.А. Структурно-механическое исследование малоциклового усталости порошковых композитов // В сб.: Деформирование и разрушение композитов, - Свердловск, 1985. - С. 104-109.

82. Изотермическая вальцовка лопаток / В.М. Михалевич, В.А. Матвийчук, В.П. Егоров, И.Ф. Корнет // Кузнечно-штамповочное производство. -1994.-N 3.-С. 6-9.

83. Изучение поведения нержавеющей стали 316 при нагружении по схемам усталости, ползучести и совместного действия ползучести и усталости / Р.Гомюк, Т.Бюи-Куок, А Бирон, М.Бернард // Современное машиностроение . - Сер.Б. - 1991. -N 1. - С. 14-23.

84. Ильюшин А.А. Механика сплошной среды. - М.: Изд-во МГУ, 1990. - 310 с.

85. Ильюшин А.А. Об одной теории длительной прочности //Изв. АН СССР. Механика твердого тела - 1967. - N 3. - С, 21-35.

86. Ильюшин А.А, Пластичность. - М.: Изд-во АН СССР, 1963. - 272 с.

87. Ильюшин А.А., Победря Б.Е. Основы математической теории термовязкой упругости. - М.: Наука, 1970 - 280 с.

88. Ионов В.Н., Селиванов В.В. Динамика разрушения деформируемого тела - М: Машиностроение, 1987. - 272 с.
89. Исследование процессов разрушения элементов тела в результате повреждаемости материала при ползучести / Ю.Н. Шевченко, Р.Г. Терехов, Н.С. Брайковская, С.М. Захаров // Прикл. мех. - 1994. - N4. - С.21-30.
90. Исследование упрочнения-разупрочнения сталей при циклическом деформировании / В.Н. Ефимов, Л.Н. Соколов, А.Н. Либин, И.С. Зельцер // Изв. вузов. Чёрная металлургия. - 1986.- N 11.- С. 77-82.
91. Итальянцев Ю.Ф. К вопросу термодинамического состояния деформируемых твёрдых тел. Сообщение 2. Энтропийные критерии разрушения и их применение для задач простого растяжения // Пробл. прочности. - 1984. -N 2. -С 76-81.
92. Калинин А.Е., Кургузкин М.Г., Шушков А.В. Критерий прочности структурно-неоднородного материала // Пробл. прочности 1993 - N 7 - С. 54-60.
93. Качалов Л.М. Основы теории пластичности. - М.: Наука. 1969. – 420 с.
94. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. - М.: Наука, 1974. – 312 с.
95. Качанов Л.М. Ползучесть и разрушение при сложном нагружении // Пробл. прочности. - 1977. - N 6. - С. 3-5
96. Карзов Г.Г., Куклина О.В., Марголин Б.З. Некоторые физико-механические подходы к анализу макроскопических критериев разрушения. Сообщение 2. Вязкое разрушение // Пробл. прочности. - 1989. - N 8. - С. 3-Ю.
97. К вопросу о влиянии кристаллографической ориентации на длительную прочность и ползучесть никелевого сплава. Сообщение 1. / Е.Р. Голубовский, В.Н. Толораия, И.Л. Светлов и др. // Пробл. прочности. - 1987. - N 9. - С. 11-17.
98. Кийко И.А. Теория разрушения в процессах пластического течения // В сб.: Обработка металлов давлением. - Свердловск, 1982. - С. 27-40.
99. Киселевский В.Н. Кинетический критерий разрушения металлов при совместном малоцикловом и квазистатическом нагружениях // Пробл. прочности. - 1982.-N 1.-С. 8-12.
100. Киселевский В.Н. К оценке остаточной долговечности металлов на основе кинетических концепций // Пробл. прочности. -1983. - N 2. - С. 3-6.
101. Киселевский В.Н. Прочность конструкционных материалов ядерных реакторов.- К.: Наук. думка, 1990. - 168 с.
102. Ковалёв В.В. Экспериментальная проверка кинетического уравнения ползучести // Пробл. прочности. - 1984. - N 3. - С. 21-25.
103. Ковальчук Б.И., Лебедев А.А., Уманский С.Э. Механика неупругого деформирования материалов и элементов конструкций - К.: Наук. думка, 1987. - 280 с.
104. Ковпак В.И. Прогнозирование жаропрочности металлических материалов. - К.: Наук. думка, 1981. - 240 с.
105. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчёты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: Справочник М.: Машиностроение, 1985. - 224 с.
106. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ. предсказание, предотвращение. - М.: Мир, 1984. - 624 с.
107. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением.- М.:

Металлургия, 1986. - 688 с.

108. Колмогоров В.Л. Напряжения. Деформация. Разрушение.- М: Машиностроение, 1970.- 232 с.

109. Колмогоров В.Л. О пластичности и деформируемости металлов // Кузнечно-штамповочное производство - 1981 - N 8. С.9-10.

110. Колмогоров В.Л., Мигачёв Б.А. Прогнозирование разрушения металлов в процессе горячей пластической деформации // Изв. АН СССР. Металлы. - 1991. - N 3. - С. 124-128.

111. Композиционные материалы: Справочник / Под общ. ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского . - М.: Машиностроение, 1990. 512 с.

112. Конкин В.Н., Морачковский О.К. Ползучесть и длительная прочность конструктивно неоднородных цилиндрических панелей и прямоугольных пластин // Пробл. прочности. - 1984. - N 3. - С. 18-21.

113. Конкин В.Н., Морачковский О.К. Ползучесть и длительная прочность лёгких сплавов, проявляющих анизотропные свойства // Пробл. прочности. -1987.- N 5. - С. 38-42.

114. Коновалов А.В. Многомерная модель и критерий вязкого разрушения при пластической деформации // Пробл. прочности. - 1988. - N 9, - С. 14-18.

115. Кононов К.М., Гецов Л.Б. Критерии разрушения материалов при циклическом нагружении // Пробл. прочности. - 1984. - N 2. - С. 81-85.

116. Копнов В.А. Длительная прочность анизотропных материалов при сложном напряжённом состоянии // Пробл. прочности. - 1982, - N 2. - С. 40-44.

117. Копнов В. А., Олодо Эссе. Об одном варианте построения критериев длительной прочности анизотропных материалов // Пробл. прочности. -1992. - N 4. - С. 3-8.

118. Коротких Ю.Г. Описание процессов накоплений повреждений материала при неизотермическом вязкопластическом деформировании // Пробл. прочности, - 1985. - N 1. - С. 18-23.

119. Коффин Л.Ф. Циклические деформации и усталость металлов // В кн.: Усталость и выносливость металлов. - М.: ИЛ, 1963. - С. 257-273

120. Красневский С.М., Макушок Е.М., Щукин В.Я. Накопление повреждаемости и критерий разрушения при пластическом формоизменении металлов // В сб.: Обработка металлов давлением. - Свердловск, 1982. - С. 40-47.

121. Красневский С.М., Макушок Е.М., Щукин В.Я. Разрушение металлов при пластическом деформировании. - Минск. Наука и техника, 1983. - 173 с.

122. Кривенюк В.В. Прогнозирование длительной прочности тугоплавких металлов и сплавов. - К.: Наук. думка. 1990. - 248 с.

123. Кривые текучести и пластичности стали ШХ15 при двукратном нагружении / А.М. Галкин, П.И. Полухин, С.П. Ефименко. В.Л. Пплюшенко // Изв. АН СССР. Металлы. - 1984, - N 6 - С. 185-188.

124. Критерий деформируемости пористого тела / Я.Е. Бейгельзимер, А.П. Гетманский, Ю.А. Палат и др. // Порошковая металлургия. - 1986. - N5. - С. 15-18.
125. Кургузкин М.Г., Калинин А.Е., Барт Ю.Я. О повреждаемости полимерных материалов в условиях одноосного растяжения // В сб.: Модели деформирования и разрушения композиционных материалов. - Свердловск, 1988. - С. 49-54.
126. Лаптев А.М. Технологические задачи теории обработки давлением пористых материалов // В сб: Реологические модели и процессы деформирования пористых порошковых и композиционных материалов. - К: Наук. думка, 1985. - С. 68-76.
127. Лебедев А.А., Гигиняк Ф.Ф., Сторчак М.Ф. Влияние перерывов в циклическом нагружении на долговечность стали 15Х2НМФА при сложном напряжённом состоянии // Пробл. прочности. -1987. - N 5. - С. 16-17.
128. Левитас В.И. Большие упругопластические деформации при высоком давлении. - К.: Наук. думка, 1987. - 232 с.
129. Лепин Г.Ф. Ползучесть металлов и критерии жаропрочности. - М: Металлургия, 1976. - 344 с.
130. Лихачёв В.А., Малинин В.Г. Структурно-аналитическая теория прочности. - Санкт-Петербург: Наука, 1993. - 471 с.
131. Лозицкий Л.П., Игнатович С.Р. Математическая модель процесса накопления повреждений в деформируемых материалах // Пробл. прочности. -1985. - N 7. -С. 34-38.
132. Локощенко А.М. Длительная прочность металлов при сложном напряжённом состоянии // Пробл. прочности. - 1983. - N 8. - С. 55-59.
133. Локощенко А.М. Определение анизотропии при исследовании длительной прочности в условиях плоского напряжённого состояния // Пробл. прочности. - 1983. - N 9. - С. 71-73.
134. Локощенко А.М., Наместникова И.В. Описание длительной прочности при ступенчатом нагружении // Пробл. прочности. - 1983. - N 1 - С. 9 -13.
135. Локощенко А.М., Шестериков С.А. Исследование длительной прочности металлов при сложном напряжённом состоянии // Пробл. прочности. - 1986. -N 12. -С. 3-8.
136. Локощенко А.М., Шестериков С.А. К проблеме оценки длительной прочности при ступенчатом нагружении // Журнал прикладной механики и технической физики. - 1982. - N 2. - С. 139-143.
137. Лукинский В.С., Зайцев Е.И. Прогнозирование надёжности автомобилей. - Л.: Политехника, 1991. - 224 с.
138. Лурье А.И. Теория упругости. - М.: Наука, 1970. - 939с.

139. Майборода В.П., Кравчук В.С., Холин Н.Н. Скоростное деформирование конструкционных материалов - М.: Машиностроение, 1986 - 264 с,
140. Малинин Н.Н. Ползучесть в обработке металлов - М : Машиностроение, 1986. - 222 с.
141. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. - М.: Машиностроение, 1975. - 400 с.
142. Мальмейсгер А.К., Тамуж В.П., Тетерс Г.А. Сопротивление полимерных и композитных материалов - Рига: Зинатне, 1980. - 572с.
143. Маньковский В.А. Длительная прочность сталей при различных напряжённых состояниях // Пробл. прочности. - 1984. - N1. - С. 74-77.
144. Матвийчук В.А., Корнет И.Ф., Покрас В.Д. Совершенствование процесса холодной штамповки вальцовкой компрессорных лопаток на основе анализа деформируемости материалов // Кузнечноштамповочное производство. - 1992. - N5. - С. 6-7.
145. Мельников Г.П, Соколов А.А. Долговечность при ступенчатом режиме нагружения // Пробл. прочности. - 1976. - N9. - С. 25-26.
146. Мельников С.В. О процессе накопления повреждений с позиций многоуровневого подхода // В сб.: Деформирование и разрушение композитов. - Свердловск, 1985. - С. 40-45.
147. Механические свойства конструкционных материалов при сложном напряжённом состоянии: Справочник / А.А. Лебедев, Б.И. Ковальчук, Ф.Ф. Гигиняк, В.П. Ламашевский. - К: Наук. думка, 1983. - 366 с.
148. Мигачёв Б.А., Журавлев Ф.М., Марков П.А. Пластичность аустенито-ферритной стали при знакопеременном кручении // В сб.: Обработка металлов давлением. - Свердловск, 1988. - С. 27-33.
149. Микляев Г.П., Фридман Н.Б. Анизотропия механических свойств металлов. - М.: Metallургия, 1986. - 225 с.
150. Михалевич В.М. Моделирование процессов немонотонного деформирования // В сб.: Технология машиностроения. - М., 1986. - Вып.12. - С. 6-7.
151. Михалевич В.М. Тензорные модели накопления повреждений при обработке металлов давлением // Всероссийской научн.-техн. конф. «Математическое моделирование технологических процессов обработки материалов давлением» (Пермь, июнь 1990 г.). Тез. докл. - Пермь, 1990. - С.34.
152. Михалевич В.М. Построение моделей накопления повреждений при пластическом деформировании // Республиканская научн.-техн. конф. "Теоретические и прикладные проблемы развития наукоёмких и малоотходных

технологий обработки металлов давлением" (Винница, май-июнь 1991 г.). Тез. докл. - Винница, 1991. - С 141-144.

153. Михалевич В.М. Модель предельных деформаций при горячем деформировании // Изв. АН СССР. Металлы. - 1991. - N 5. - С. 89-95.

154. Михалевич В.М. Модели длительной прочности // Республиканская научно-техн. конф. «Социально-экономические аспекты и ресурсосбережение на автомобильном транспорте» (Винница, 17-18 декабря 1992 г.). Тез. докл. – Винница - 1992 -С. 110-111.

155. Михалевич В.М. Модели накопления повреждений для тел с начальной и деформационной анизотропией // Изв. Российской АН. Металлы. -1993. -N 5. -С. 144-151.

156. Михалевич В.М. Тензорні моделі накопичення пошкоджень у початково ізотропних середовищах при непружному деформуванні // Вісник Вінницького політехнічного інституту. - 1993. - N 1. - С 70-72.

157. Михалевич В.М. Пластичность при циклическом горячем деформировании // Пробл. прочности. - 1994. -N 6. - С. 10-17.

158. Михалевич В.М. Длительная прочность при циклическом нагружении // Международная научно-техн. конф. «Применение колебаний в технологиях. Расчёт и проектирование машин дня реализации технологий» (Винница, сентябрь 1994 г.). Тез. докл. - Винница. - 1994. - С. 157-158.

159. Михалевич В.М. Модель накопления повреждений в материалах с неполным восстановлением пластичности в паузах // Международная научно-техн. конф. «Новые технологии и организационные структуры на автомобильном транспорте» (Винница, декабрь 1994г.). Тез. докл. - Винница. - 1994. - С. 119-121.

160. Михалевич В.М. Прогнозирование длительной прочности при нестационарном нагружении // Международная научно-техн. конф. «Новые технологии и организационные структуры на автомобильном транспорте» (Винница, декабрь 1994г.). Тез. докл. - Винница - 1994. - С. 151-152.

161. Михалевич В.М. Тензорные модели длительной прочности. Сообщение 1. Длительная прочность при стационарном нагружении // Пробл. прочности. - 1995. - N8. - С. 76-90.

162. Михалевич В.М. Тензорные модели длительной прочности. Сообщение 2. Критериальные соотношения при ступенчатых нагружениях // Пробл. прочности. - 1995. - N 9. - С. 67-79.

163. Михалевич В.М. Тензорные модели длительной прочности. Сообщение 3. Критериальные зависимости при нагружений с изменением напряжённого состояния и направлений главных напряжений // Пробл. прочности. -1995. -N 10. - С. 101-112.

164. Михалевич В.М., Егоров В.П., Вайцехович С.М. Накопление повреждаемости при холодном и горячем деформировании // 4-я научно-техн. конф. «Современные достижения в теории и технологии пластической деформации металлов, термообработке и повышение долговечности изделий» (Горький, октябрь, 1989г.).

Тез. докл. - Горький; 1989. - С. 10-11.

165. Михалевич В.М., Мишулин А.А., Савчинский И.Г. Деформируемость заготовок при осадке с различной интенсивностью бочкообразования // В сб.: Технология машиностроения. - М.: 1986. - Вып. 5. - С. 8-11.

166. Михалевич В.М., Петрунина И.С. Моделирование разрушения при холодном двухэтапном деформировании // Республиканская научн. техн. конф. «Социально-экономические аспекты и ресурсосбережение на автомобильном транспорте» (Винница, 17-18 декабря 1992 г.). Тез. докл. - Винница. - 1992. -С. 90-91.

167. Мишулин А.А., Михалевич В.М. Совершенствование технологииковки на основе описания деформационной анизотропии пластичности // В сб. Оптимизацияковки на автоматизированных ковочных комплексах. - М., 1982.-С. 144-161.

168. Мишулин А.А., Михалевич В.М. Деформационное разрыхление и разрушение металлов в процессах пластического течения // В сб.: Исследования в области пластичности и обработки металлов давлением. - Тула, 1983. -С. 82-86.

169. Мишулин А.А., Михалевич В.М. Тензорно-нелинейная модель накопления повреждений // В сб.: Обработка металлов давлением. - Свердловск, 1985. -С. 10-14.

170. Мишулин А.А., Михалевич В.М. Анизотропия предельных деформаций // В сб.: Технология машиностроения. - М., 1987. Вып. I. - С. 7-9.

171. Мишулин А.А., Михалевич В.М., Дененберг Н.П. Влияние на деформируемость заготовки режимов протяжки // В сб.: Технология машиностроения. - М., 1986. - Вып. 6. - С. 8-9.

172. Мишулин А.А., Михалевич В.М., Егоров В.П. Моделирование многоэтапного деформирования пористых тел // Республиканская научно-техн. конф. «Теоретические и прикладные проблемы развития наукоёмких и малоотходных технологий обработки металлов давлением» (Винница, май-июнь 1991 г.). Тез. докл. - Винница, 1991. - С. 196.

173. Мишулин А.А., Михалевич В.М., Лобода В.А. Исследование процесса продольного обжима мерных заготовок при штамповке полукорпусов // Республиканская научно-техн. конф. «Теоретические и прикладные проблемы развития наукоёмких и малоотходных технологий обработки металлов давлением» (Винница, май-июнь 1991 г.). Тез. докл. - Винница, 1991.-С. 120-121

174. Мовчан А. А. Микромеханический подход к проблеме описания накопления анизотропных рассеянных повреждений // Изв. АН СССР. Механика твёрдого тела - 1990. - N 3. - С. 115-123.

175. Мовчан А.А. О влиянии истории нагружения на скорость накопления повреждений при немонотонном упругопластическом нагружении // Прикл. механика и техн. физика. - 1984. - N 5. - С. 125-131

176. Мовчан А. А. О законе суммирования повреждений при сложных путях пластического деформирования // Пробл. прочности. - 1981. - N 8. - С 28-32.

177. Мовчан А. А. Феноменологическое описание дислокационного механизма образования зародышевых дефектов при пластическом деформировании // Прикл. механика и техн. физика. - 1987. - N 1. - С. 147-155.

178. Можаровская Т.Н. Влияние третьего инварианта девиатора напряжений на длительную прочность материала в условиях плоского напряженного состояния // Пробл. прочности. - 1982. - N 6. - С. 53-55.

179. Можаровская Т.Н. Критерий длительной прочности и ползучести металлических материалов при сложном напряжённом состоянии // Пробл. прочности. - 1988. - N 2. - С. 57-60.
180. Можаровская Т.Н. Обобщённое уравнение длительной прочности материалов при плоском напряжённом состоянии // Пробл. прочности. - 1988. - N3. - С. 51-54.
181. Можаровская Т.Н. Ползучесть и длительная прочность сталей перлитного и аустенитного классов при активном пропорциональном нагружении в условиях плоского напряжённого состояния // Пробл. прочности. - 1985. - N4. - С. 49-54.
182. Можаровская Т.Н. Программа и методика исследования ползучести и длительной прочности материалов с учётом вида девиатора напряжений и истории нагружения // Пробл. прочности. - 1984. - N 11. - С. 83-88.
183. Можаровский Н.С. Теория пластичности и ползучести в инженерном деле. - К.: Выща шк., 1991. - 264 с.
184. Можаровский Н.С., Антипов Е.А. Упругопластическое деформирование и разрушение материалов при нестационарных силовых и тепловых воздействиях. - К.: Выща шк., 1985. - 140 с.
185. Можаровский Н.С., Антипов Е.А., Бобырь Н.И. Ползучесть и долговечность материалов при программном нагружении. - К.: Выща шк., 1982. -130 с.
186. Можаровский Н.С., Рудаков К.Н., Заховайко А.А. Пластичность и долговечность элементов машин при различных траекториях нагружения. - К.: Выща шк., 1988. - 147 с.
187. Можаровский Н.С., Рудаков К.Н., Шукаев Н.С. Циклическое упругопластическое деформирование и долговечность материалов при простых и сложных нагружениях // Пробл. прочности. - 1985 -N 10.- С 49-55.
188. Можаровский Н.С., Шукаев Н.С. Долговечность конструкционных материалов при непропорциональных путях малоциклового нагружения // Пробл. прочности. - 1988. - N 10. - С.47-54.
189. Москвитин В.В. Сопротивление вязко-упругих материалов. - М.: Наука, 1972.- 327 с.
190. Москвитин В.В. Циклические нагружения элементов конструкций. - М.: Наука, 1981.- 344с.
191. Мороз Л.С. Механика и физика деформаций и разрушения материалов. - Л.: Машиностроение, 1984. - 224 с.

192. Мороз Л.С., Лихачёв В.А., Голотин А.Е. О феноменологических теориях кинетического механизма разрушения металлических материалов // Пробл. прочности. - 1977. - N 8. - С 11-18.
193. Мураками. Сущность механики повреждённой сплошной среды и ее приложения к теории анизотропных повреждений при ползучести // Теорет. основы инж. расчётов - 1993 - г. 105 - N 2. - С 28-35.
194. Мустафин Ч.Г. К оценке длительной прочности при программном изменении напряжений // Пробл. прочности. - N 4. - С.23-29.
195. Мэнсон С. Температурные напряжения и малоцикловая усталость. - М.: Машиностроение, 1974. - 344 с.
196. Надёжность и долговечность машин / Под общ. ред. Б.И. Костецкого. - К.: Техника, 1975. - 408 с.
197. Напряжённо-деформированное состояние на боковой поверхности заготовок при протяжке плоскими бойками / А.А. Мишулин, В.М. Михалевич, Н.П. Дененберг, В.А. Сальников. - В сб. Технология машиностроения. - М.: 1986. - Вып. 5. - С. 12-14.
198. Нарисава И. Прочность полимерных материалов. - М.: Химия, 1987. - 400 с.
199. Немец Я., Серенсен С.В., Стреляев В.С. Прочность пластмасс. - М.: Машиностроение, 1970. - 335 с.
200. Новожилов В.В. О пластическом разрыхлении // Прикл. математ. и мех. - 1965. - т. 29. - N 4. - С. 681-689.
201. Новожилов В.В., Кадашевич Ю.И., Рыбакина О.Г. Разрыхление и критерий разрушения в условиях ползучести // Докл. АН СССР. - 1983. - т. 270. - N 4. - С. 831-835.
202. Новые процессы деформации металлов и сплавов / А.П. Коликов, П.И. Полухин, А.В. Крупин и др. - М.: Высш. шк., 1986. - 351 с.
203. Нотыч А.А., Звонарев Е.В., Методы оценки технологической пластичности при обработке давлением порошковых материалов II. Критерии разрушения, учитывающие напряжённое состояние // Порошковая металлургия. - 1991.- N9. -С 10-15.
204. Обобщённый критерий длительной прочности вязкоупругих материалов / Ю.Я. Барт, В.П. Трифонов, А.Б., Козаченко, Н.И., Малинин // Механика полимеров. - 1975. - N 5. - С 791-794.
205. Овчинников И.В. Об определении ресурса пластичности при действии тока // Пробл. прочности. - 1993. - N 6. - С. 54-59
206. Огибалов П.М., Ломакин В.А., Кишкин Б.П. Механика полимеров. - М.: МГУ 1975. -528 с.
207. Огородников В.А. Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении. - К: УМК ВО, 1989 - 152 с.
208. Огородников В.А. Оценка деформируемости мегалитов при обработке давлением. - К.: Выща шк., 1983. - 173 с.
209. Олдырев П.П., Парфеев В.М. Долговечность полиметилметакрилата при стационарном и ступенчатом неизотермических режимах циклического нагружения // Механика полимеров. - 1975. - N 5. - С. 795-803.
210. Определение предельных единичных обжатий при протяжке / А.А. Мишулин,

А.Г. Токарев, В.М. Михалевич, Н.П. Дененберг // В сб. Технология машиностроения. - М.: 1986. - Вып. 5. - С. 11-12.

211. Осасюк В.В. К вопросу об оценке остаточного ресурса материала элементов конструкций энергетического оборудования после длительной эксплуатации // Пробл. прочности. - 1989. - N1. - С. 62-67.

212. Осасюк В.В., Олисов А.Н. К вопросу о гипотезах суммирования относительных долговечностей // Пробл. прочности. - 1979. - N П. - С. 31-33.

213. Осасюк В.В., Семёнов Г.Р., Озеряный Д.Н. Оценка остаточного ресурса и напряжений наработки при постоянной и переменной нагрузке методом смещённых диаграмм с использованием ЭВМ // Пробл. прочности. - 1987. - N1. - С. 69-73.

214. Павлов П.А. Механические состояния и прочность материалов. - Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1980. - 176 с.

215. Павлов П.А. Основы инженерных расчетов элементов машин на усталость и длительную прочность. - Л.: Машиностроение, 1988. - 252 с.

216. Павлов П.А., Гецов Л.Б., Краснов Е.Г. Использование деформационного критерия для расчетной оценки условий разрушения материалов при циклическом нагружении в условиях сложного напряжённого состояния // Пробл. прочности; - 1989. - N 3. - С. 8-11.

217. Павлов П.А., Кадырбеков Б.А., Борисевич В.В. Оценка сопротивлению коррозионному растрескиванию сталей при сложном напряжённом состоянии // Пробл. прочности. - 1988. - N 3. - С. 84-87.

218. Павлов П.А., Курилович Н.Н. Длительное разрушение жаропрочных сталей при нестационарном нагружении // Пробл. прочности. - 1982. - N2 - С. 44-47.

219. Павлов П.А., Огородов Л.И. Длительная прочность поливинилхлорида и проверка работоспособности уравнения повреждений наследственного типа // Изв. вузов. Строительство и архитектура. - 1990. - N 9, - С. 125-127.

220. Павлов П.А., Огородов Л.И. Длительная прочность и оценка повреждённости дисперсно-наполненных композиционных материалов на основе фенопласта при одноосном сжатии // Пробл. машиностроения и надёжности машин. - 1991. - N 6. - С. 37-44

221. Панов А.Д. Обобщённая теория упругости изотропного нелинейно-упругого тела. Критерии прочности и пластичности // В сб.: Расчеты на прочность. - М.: Машиностроение, 1987. - Вып.28. - С. 41-46.

222. Паршин В.А., Зудов Е.П., Колмогоров В.Л. Деформируемость и качество. - М.: Металлургия, 1979. - 192 с.

223. Пачурин Г.В., Гусякова Г.П. Оптимизация режимов технологической обработки с целью повышения сопротивлению металлических материалов. - Нижний Новгород: НТО Машпром. 1991 - 70 с.

224. Перельман В.Е. Формование порошковых материалов. - М.: Металлургия, 1979. - 232 с.

225. Перетяцько В.Н. Пластичность металла при горячей деформации // В сб.: Обработка металлов давлением. - Свердловск, 1982. - С. 58-54.

226. Перетяцько В.Н., Обищенко С.А., Дадочкина Т.Н. Оценка повреждаемости при горячей кручении // В сб.: Обработка металлов давлением. - Свердловск, 1982. - С. 96-100.

227. Пестов В.С. Повышение качества поковок и деформируемости металла

применением междеформационных и других явлений неоднородности обработки // В сб.: Обработка металлов давлением. - Свердловск, 1988. - С. 63-71.

228. Петросян Г.Л. Пластическое деформирование порошковых материалов. - М.: Металлургия, 1988. - 152 с.

229. Писаренко Г.С. Актуальные вопросы прочности в современном машиностроении. - К: Наук, думка, 1992. - 192 с.

230. Писаренко Г.С. Воспоминания и размышления. - К. Наук, думка, 1994. - 448 с.

231. Писаренко Г.С. Прочность и научно-технический прогресс // Пробл прочности. - 1986. - N 1. - С. 3-6.

232. Писаренко Г.С., Лебедев А.А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряжённом состоянии. - К: Наукова думка, 1976. - 415 с.

233. Писаренко Г.С., Можаровский Н.С., Антипов Е.А. Пластичность и прочность материалов при нестационарных нагружениях. - К.: Наук, думка, 1984. - 216 с.

234. Пластичность и разрушение / Под ред. В.Л. Колмогорова. - М.: Металлургия, 1977. - 336 с.

235. Победря Б.Е. Критерий прочности однонаправленного волокнистого композита // Пробл. прочности. - 1987. - N 7. - С. 3-4.

236. Победря Б.Е. Лекции по тензорному анализу. М.: МГУ, 1986. - 264 с.

237. Повышение пластичности хромоникелевых и титановых сплавов при немономтонном деформировании и термической обработке / В.А. Матвийчук, В.М. Михалевич, В.А. Фомичёв, В.П. Егоров // В сб.: Ресурсосберегающая технология и оборудование штамповочного производства в машиностроении. - Рыбинск, 1989. - С. 32-37.

238. Поздеев А.А., Ефимов И.Н., Кириенко Г.И. Об одном варианте теории прочности А.А. Ильюшина // В сб.: Полимерные материалы в машиностроении. - Пермь, 1975. - N 171. - С. 3-6.

239. Полухин П.И., Горелик С.С., Воронцов В.К. Физические основы пластической деформации - М.: Металлургия. - 1982 - 584 с.

240. Полухин П.И., Гун В.Я., Галкин А.М. Пластометрические исследования пластичности металлов и сплавов // В сб.: Обработка металлов давлением. - Свердловск, 1985. - С 53-56.

241. Полухин П.И., Гун В.Я, Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: Справочник. - М.: Металлургия, 1983. - 352 с.

242. Попильский Р.Я., Пивинский Ю.Е. Прессование порошковых керамических масс. - М.: Металлургия, 1983. - 176 с.

243. Пресс-форма дня прессования изделий из порошков. Вайцехович С.М., Михалевич В.М., Романихин М.В., Питюлин А.Н., Кужель А.Е., А.с. N 1694341. Оpubл. Б.И. N 44, 1991.

244. Пресс-форма для прессования с раздачей заготовок из порошков. Вайцехович С.М., Михалевич В.М., Романихин М.В., Питюлин А.Н., Кужель А.Е., Лебедев В.Н., Стебунов С.А. А.с. N1675053. опубл.Б.И. N 33, 1991.

245. Применение теории ползучести при обработке металлов давлением / А.А. Поздеев, В.И. Тарновский, В.И. Еремеев, В.С. Баакашвили. - М.: Металлургия, 1973. - 192 с.

246. Прочность и долговечность элементов энергетического оборудования / Б. Поспишил, А.Л. Квитка, Г.Н. Третьяченко и др. - К.: Наук, думка, 1987. - 216 с.

247. Прочность материалов и конструкций при криогенных температурах / В.А. Стрижало, Н.В. Филин, Б.А. Куратов и др. - К.: Наук, думка, 1988, -240 с.
248. Прочность трубчатых заготовок при циклической раздате / Г.Д. Дель, О.А. Розенберг. О.В. Соловьёв, Ю.А. Цеханов // Пробл. прочности. - 1991. - N 8. - С 81-85.
249. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твёрдого тела. - М.: Наука, 1988. - 712 с.
250. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. - М.: Наука, 1966. - 752 с.
251. Работнов Ю.Н. Элементы наследственной механики твёрдых тел, -М.: Наука, 1977. - 384 с.
252. Радомысельский И.Д., Баглюк Г.А. Применение модели вязкопластического пористого тела к решению задач горячей деформации // Порошковая металлургия. - 1985. - N2. -С 7-13.
253. Радченко В.П. Прогнозирование ползучести и длительной прочности материалов на основе энергетического подхода в стохастической постановке // Пробл. прочности. - 1992. -N 12. – С. 34-40.
254. Разработка процессов изотермической вальцовки на основе моделирования накопления повреждаемости металлов / В.М. Михалевич, В.А. Матвийчук, В.А. Фомичёв, И.Ф. Корнет // В сб.: Обработка металлов давлением. - Свердловск, 1992. - С. 58-64.
255. Расчет термонапряжений и прочности роторов и корпусов турбин / К.В. Фролов, Ю.Л. Израилев, Н.А. Махутов и др. - М.: Машиностроение, 1988.-239 с.
256. Расчёты машиностроительных конструкций методом конечных элементов: Справочник / Под общ. ред. В.И. Мяченкова. - М.: Машиностроение, 1989. - 520 с.
257. Рвачёв М.А. Критерий деформируемости металлов при обработке давлением. - Винница, 1985. - 11 с. - Деп. в УкрНИИНТИ 24.06.85, N 1404-Ук 85.
258. Роу. Исследование температурно-временного параметра длительной прочности коррозионностойкой стали 316 в условиях возрастающего напряжения // Теорет. основы инж. расчётов. - 1983. - т. 105. - N 2. - С. 21-28.
259. Рыбакина О.Г. Феноменологическое описание разрушения металлов при некоторых видах асимметричного деформирования // Изв. АН СССР. Механика твёрдого тела - 1969. - N 6. - С. 108-111.
260. Рыбакина О.Г. Феноменологическая теория малоциклового усталости / В кн.: Актуальные проблемы нелинейной механики сплошных сред. - Л.: Изд-во ЛГУ, 1977. - С 104-131.
261. Сегал В.М. Вязкое разрушение при немонотонном нагружении // В сб.: Обработка металлов давлением. - Свердловск, 1985. - С. 14-19.
262. Сегал В.М. Критерий разрушения пластичных металлов при немонотонном нагружении // Пробл. прочности. -1985. - N 3. - С. 3-7.
263. Сегал В.М. Структурные параметры в континуальной модели вязкого разрушения // Пробл. прочности. - 1983. - N 4. - С.47-50.
264. Сегал В.М., Резников В.И. Вязко-пластическое течение пористого тела // Порошковая металлургия. - 1984. - N1. - С13- 18.
265. Седов Л.И. Механика сплошной среды. - М.: Наука, 1970. т. 2. - 568 с.

266. Серенсен С.В. Усталость материалов и элементов конструкций. - Избр. тр.: В з-х т. - К.: Наук, думка, 1985. - т. 2. - 256 с.

267. Серенсен С.В. Квазистатическое и усталостное разрушение материалов и элементов конструкций. - Избр. тр.: В з-х т. - К.: Наук, думка, 1985. -т. 3. - 232 с.

268. Скудное В.А., Виноградов В.Е. О взаимосвязи холодной пластической деформации и разрушения нержавеющей мартенситностареющей стали X11N10M2T // Пробл. прочности. - 1984. - N 7. - С. 54-59

269. Скудра А.М., Булаве Ф.Я., Роценс К.А. Ползучесть и статическая усталость армированных пластиков. - Рига: Зинатне, 1971. - 238 с

270. Слуцкер А.И., Куксенко В.С. Зародышевые субмикроскопические трещины в нагруженных полимерах // Механика полимеров. - 1975 - N 1. - С. 84-94.

271. Смелянский В.М., Калпин Ю.Г., Баринов В.В. Исчерпание запаса пластичности в поверхностном слое деталей при обработке обкатыванием //Вестник машиностроения.- 1990.- N 8. - С. 54-58.

272. Смирнов-Аляев Г.А. Механические основы пластической обработки металлов. - Л.: Машиностроение, 1968. - 271 с.

273. Смирнов-Аляев Г.А. Сопротивление материалов пластическому деформированию. - Л.: Машиностроение, 1978. - 368 с.

274. Соколкин Ю.В., Сиринов Ю.П. Усталость композитов: особенности процесса разрушения и математическое моделирование // В сб.: Деформирование и разрушение композитов. - Свердловск, 1985. - С. 97-103.

275. Соколкин Ю.В, Ташкинов А.А. Механика деформирования и разрушения структурно-неоднородных тел. -М.:Наука, 1984- 116 с.

276. Соколкин Ю.В., Шестаков П.Д. Кинетика процесса накопления циклических повреждений // В сб.: Деформирование и разрушение структурно-неоднородных материалов. - Свердловск, 1989. - С. 27-31.

277. Соколовский В.В. Теория пластичности. - М.: Высш. шк., 1969. -608 с.

278. Соломатов В.И., Селяев В.П. Химическое сопротивление композиционных строительных материалов. - М.: Стройиздат, 1987. - 264 с.

279. Соснин О.В. О прогнозировании длительной прочности материала для интервала температур // Пробл. прочности. - 1982. - N 4. - С. 45-47.

280. Сосновский А.А. Об оценке долговечности при циклических нагружениях // Пробл. прочности. -1986. - N 11 - С. 16-21.

281. Сосновский А.А., Махутов Н.А. Предельные состояния силовых систем и процессы их повреждения. Сообщение 2. Долговечность и меры повреждённости //Пробл. прочности.- 1983 -N3.- С. 17-27.

282. Способ изготовления ступенчатых поковок.Дененберг Н.П., Пименов Г.А., Соболев В.Д., Петунии А.Ю., Скударь Г.М., Михалевич В.М А.с.N 1238868 . Оpubл. Б.И. N23, 1986.

283. Способковки заготовки. Дененберг Н.П., Токарев А.Г., Бобров А.А., Скударь Г.М., Михалевич В.М. А.с.N189560. Оpubл. Б.И. N41, 1985.

284. Способ прессования изделий из порошкообразного материала Вайцехович С.М., Мишулин А.А., Михалевич В.М., Стебунов С.А., Лошкарёв О.Н., Романихин М.В. Ас. N1475772, Оpubл. Б.И. N16, 1989,

285. Справочное пособие по расчёту машиностроительных конструкций на прочность / Под общ. ред. А.А. Лебедева. - К.: Тэхника, 1990. - 240 с.

286. Стасенко И.В. Расчёт трубопроводов на ползучесть. - М.: Машиностроение, 1986. - 256 с.
287. Степанов В.А. Деформация и разрушение полимеров // Механика полимеров.-1975. - N 1. - С. 95-106.
288. Степанов Г.В Упруго-пластическое деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении. - К.: Наук. думка, 1991. - 288 с.
289. Степанов В.Г., Клестов М.И. Поверхностное упрочнение корпусных конструкций. Л.: Судостроение, 1977. -198 с
290. Стрельников В.П. Приложение теории марковских процессов к исследованию усталостной долговечности // Пробл. прочности. - 1986. - N 2. - С. 13-17.
291. Стреляев В.С., Константинов В.А. Сопrotивление стеклопластиков длительному разрушению при сдвиге // Механика полимеров. -1970. - N 2. - С. 295-302.
292. Стрижало В.А. Циклическая долговечность и ползучесть металлов при малоцикловом нагружении в условиях низких и высоких температур. - К.: Наук. думка, 1978. - 238 с.
293. Суворова Ю.В. О критерии прочности, основанном на накоплении повреждённости и его приложении к композитам // Изв. АН СССР. Механика твёрдого тела -1974. - N 4. - С. 107-111.
294. Талыблы Л.Х. К вопросу деформирования и разрушения вязкоупругих тел при наличии температурного поля // Изв. АН СССР. Механика твёрдого тела. -1990. - N -. - С. 127-139.
295. Теорияковки и штамповки: Учебн. пособие для студентов машиностроительных и металлургических специальностей вузов / Под общ. ред. Е.П. Унксова, А.Г. Овчинникова. - М.: Машиностроение, 1992. - 720 с.
296. Томилов Ф.Х. Зависимость пластичности металлов от истории деформирования // В сб.: Обработка металлов давлением. - Свердловск, 1987. - С. 71-74.
297. Третьяченко Г.Н., Карпинос Б.С. Прочность и долговечность материалов при циклических тепловых воздействиях. - К.: Наук, думка 1990. - 256 с.
298. Тропотов А.В. Об испытании на длительную прочность металла после пластической деформации // В сб.: Обработка металлов давлением. - Свердловск, 1982. - С. 106-110.
299. Тропотов А.В., Богатов А.А. Определение предельных обжатий при осадке цилиндрических заготовок // В сб.: Обработка металлов давлением. - Свердловск, 1984. - С. 59-63.
300. Трощенко В.Т., Митченко Е.И. Прогнозирование долговечности при программном циклическом напряжении с учётом рассеяния свойстве // Пробл. прочности. - 1984. - N10. - С. 3-8.
301. Трощенко В.Т., Сосновский Л.А. Сопrotивление усталости металлов и сплавов: Справочник. - ч. 1,2. - К: Наук. думка, 1987. - 1332 с.
302. Угорский А.Э. Анализ и построение критериев статического разрушения. Сообщение 1. Критерии И.И. Трунина // Пробл. прочности. - 1990. – N2. – С. 23-34.
303. Ушков С.С. Разуваева И.Н., Иванова Л.А. Равномерная деформация металлов и сплавов и её значение в технологической пластичности // Пробл. прочности. - 1989. - N4. - с. 49-53.
304. Феноменологические теории прессования порошков / М.Б. Штерн, Г.Г. Сердюк, Л.А. Максименко и др. - К.: Наук. думка, 1982. - 140 с,

305. Фрайфельд В.Э. Экспериментальный анализ кинетики повреждённости и прогнозирование длительной прочности материалов // Пробл. прочности. - 1988. - N 9. - С. 30-35.

306. Фрайфельд В.Э., Сорокин О.В., Прогнозирование длительной прочности с помощью метода ступенчатого нагружения образцов // Пробл. прочности. - 1979. - N4. - С. 41- 43.

307. Хричиков В.В. Модели деформирования и разрушения стареющих материалов // Пробл. прочности. - 1990. - N 4. - С. 34-37.

308. Хульт Я. О механике разрушения при ступенчатом нагружении // В кн.: Механика деформируемых тел и конструкций. - М.: Машиностроение, 1975. - С. 495-501.

309. Чадек Й. Ползучесть металлических материалов. - М.: Мир, 1987. -304 с.

310. Чаусов Н.П, Марусий О.И., Лебедев А.А. Влияние вида напряженного состояния на микромеханизмы разрушения мартенситностареющей стали в условиях равновесного деформирования // Пробл. прочности. - 1991. -N3. - С. 68-73.

311. Черепанов Г.П. Механика разрушения и кинетическая теория прочности // Пробл. прочности. - 1989. - N 11. - С. 3-8.

312. Шаповалов Л.А. Моделирование в задачах механики элементов конструкций. - М.: Машиностроение, 1990. - 288 с.

313. Шевченко Ю.Н. Термовязкоупругопластические процессы деформирования элементов твёрдого тела (обзор) // Прикл. механика. - 1994. - N 3. - С. 3-24.

314. Шевченко Ю.Н., Терехов Р. Г. Физические уравнения термовязкопластичности. - К.: Наукова думка, 1982. - 240 с.

315. Шестаков Н.А. Оценка залечиваемости дефектов при немонотонном деформировании некомпактных материалов // Изв. вузов. Машиностроение. - 1989. - N 8. - С. 92-98.

316. Шестаков Н.А., Тимофеев В.Н., Жуков О.В. Исследование закономерностей пластической сварки фрагментов при горячем деформировании заготовок из некомпактных материалов // Изв. вузов. Машиностроение. - 1991. -N10-12. -С. 116-120.

317. Шоу М.С. Критический обзор критериев механического разрушения // Теорет. основы инж. расчётов. - 1984. - т.106 - N 3 - С. 9-18.

318. Шубенко-Шубин Л.А., Шубенко АЛ., Ковальский А.Э. О кинетической модели разрушения материалов при эрозионном воздействии влаги // Пробл. прочности. - 1984. - N 1. - С. 95-99.

319. Шульга С.А., Аверкиев А.Ю. Автоматизированное построение предельных деформаций листового металла // Кузнечно-штамповочное производство. -1992.-N 5. - С. 18-21.

320. Экспериментальная механика / Под ред. А. Кобаяси. - М.: Мир, 1990. - кн. 1.- 616 с.

321. Экспериментальная механика / Под ред. А. Кобаяси. - М.: Мир, 1990. -кн. 2. - 552 с.

322. Baily J. Atlemp to correlate some tensile strength mesurement of glass. -«Glass Industry», 1939. v.20, N1-3., p.26-28.

323. Hoff N.J. The necking and the rupture of rods subjected to constante tensile loads / /J. Appl. Mech. - 1953. -20, N1. -p.105-108.

324. Miner M. A. Cumulative damage in fatigue // J. Appl. Mech. - 1945. -N12.-p. A159-

A164.

325. Palmgren A. Die Lebensdauer von Kugellagern // Z. Vereins Deutscher Ing. - 1924, - 68, N14. - P. 339-341.

326. Robinson E.L. Effect of temperature variation on the long time rupture strength of steels. - Trans. ASME, 1952, 74. - N5. - p. 774-781.

Наукове видання

Володимир Маркусович Михалевич

Тензорні моделі накопичення пошкоджень

Монографія

Видання здійснено в авторській редакції

Формат 29.7×42 ¼

Гарнітура Times New Roman Cyr

Друк різнографічний Зам. 98-0044

Наклад 320 прим.

Якість друку відповідає якості оригіналу, поданого автором

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі ВДТУ

286021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 93, головний корпус ВДТУ, 9-й поверх

Тел.: **(0432) 44-01-59**