

УДК 539.374; 539.375

**М. Шульженко, докт. техн. наук; П. Гонтаровський, канд. техн. наук;
Ю. Матюхін, канд. техн. наук; С. Панасенко**

*Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного
НАН України*

РОЗРАХУНКОВА ОЦІНКА ЖИВУЧОСТІ ПЛАСТИН ПРИ ПОВЗУЧОСТІ З ВИКОРИСТАННЯМ ПАРАМЕТРІВ РОЗСІЯНОГО ПОШКОДЖЕННЯ

***Резюме.** На основі механіки розсіяних пошкоджень запропоновано розрахункову скінченноелементну методику для оцінювання появи і розвитку тріщин в умовах повзучості. Наведено аналіз кінетики тріщини в пластині в довимірній та тривимірній постановках.*

***Ключові слова:** метод скінченних елементів, повзучість матеріалу, розсіяні пошкодження, кінетика тріщин, оцінка живучості.*

N. Shulzhenko, P. Gontarovskiy, Yu. Matyukhin, S. Panasenko

ESTIMATION OF STRUCTURAL COMPONENTS LIFETIME UNDER THE CREEP USING CONTINUUM DAMAGE MECHANICS

***The summary.** Continuum damage-based finite element techniques have been proposed to analyze creep crack initiation and growth. The paper presents a detailed analysis of creep rupture in plate with gash for two-dimensional and three-dimensional statement.*

***Key words:** finite element method, creep, continuum damage mechanics, crack growth, lifetime estimation.*

Метою даної роботи є оцінювання можливостей розрахункової методики на основі механіки розсіяних пошкоджень і методу скінченних елементів для описування кінетики тріщин в умовах повзучості матеріалу.

Високотемпературні деталі енергомашин працюють в умовах повзучості матеріалу, при яких незворотні деформації супроводжуються накопиченням пошкодження в матеріалі, зародженням і розвитком тріщин. Ресурс конструкції визначається як час до появи макротріщин на основі розрахунків малоциклової втоми та довготривалої міцності елементів. Якщо при їх експлуатації допускається наявність тріщин, то при визначенні ресурсу враховується також час їх підростання до критичних розмірів. Він оцінюється на основі розрахунків тріщиностійкості й використовується також при визначенні термінів контрольних оглядів. Розрахунки кінетики тріщин базуються на положеннях механіки крихкого руйнування [1, 2]. В розрахунках малоциклової втоми, повзучості й тріщиностійкості використовуються експериментальні дані про властивості матеріалів, які визначаються довготривалими складними дослідженнями в лабораторних умовах [3, 4].

В останній час з'являються роботи, в яких ріст тріщин пов'язується з накопиченням розсіяних пошкоджень у матеріалі [5-9]. Значна увага при цьому приділяється повзучості і руйнуванню пластин з вирізами [5-8]. Крім того, методи механіки розсіяних пошкоджень успішно використовуються в розрахунках довготривалої міцності високотемпературних елементів машин [10-12]. Створення методики оцінювання кінетики тріщин на основі використання положень механіки розсіяних пошкоджень та даних експериментальних досліджень лабораторних зразків

при повзучості дозволить вирішити практичні завдання живучості й ресурсу високотемпературних елементів машин і тому є актуальним напрямком досліджень.

В даній роботі оцінюється можливість розрахункового визначення кінетики тріщин при повзучості з використанням положень механіки розсіяних пошкоджень у пластинчастих елементах машин.

Для моделювання кінетики тріщини в конструктивних елементах використовуються модифіковані скінченноелементні програмні комплекси, розроблені авторами [13, 14]. Розраховуються повзучість і пов'язане з нею пошкодження до досягнення ним критичного значення в одному чи кількох скінченних елементах. Коли пошкодження досягає критичного значення, ці елементи вважаються зруйнованими і їх пружні характеристики зменшуються в 10^7 разів. При цьому скінченні елементи, по яких «пройшла» тріщина, практично не впливають на деформацію конструкції, бо напруження в них є близькими до нуля.

В момент руйнування елемента відбувається перерозподіл напружень в тілі і для їх знаходження формується й розв'язується нова система рівнянь методу скінченних елементів. Залежно від рівня напружень розв'язується задача теорії пружності чи теорії пластичності типу течії з ізотропним зміцненням, що задовільно описує процеси деформування при активному навантаженні [13]. У проміжках між актами руйнування елементів, коли протікають процеси релаксації напружень і накопичення пошкоджень, методом кроків за часом розв'язується задача повзучості. При цьому структура системи рівнянь методу скінченних елементів не змінюється й операції здійснюються лише з правими частинами, що більше, ніж на порядок скорочує час розв'язання задачі.

Для визначення деформацій повзучості й пошкодження ізотропного матеріалу використовуються залежності теорії повзучості типу течії з анізотропним зміцненням і кінетичні рівняння пошкодження у вигляді [11]

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \lambda(s_i, \omega, T) s'_{ij},$$

$$\dot{\rho}'_{ij} = \frac{2}{3} H(\sigma_i) \dot{\varepsilon}_{ij} - \mu(\rho_i, \omega, T) \rho'_{ij}, \quad (1)$$

$$\dot{\omega} = \frac{\sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}}{A_*(\sigma_i, T)}, \quad (0 \leq \omega \leq 1), \quad (2)$$

$$\dot{\psi}_v = \frac{Q(\sigma_e)}{(1-\omega)^{\alpha(\sigma_i)}} \exp(k\sigma_e) \exp(\delta T), \quad (0 \leq \psi_v \leq 1), \quad (3)$$

$$\text{де } \lambda = \frac{3a}{2s_i(1-\omega)^{\alpha(\sigma_i)}} \exp(\beta s_i) \exp(\gamma T);$$

$$\mu = \frac{b}{\rho_i(1-\omega)^{\alpha(\sigma_i)}} \exp(\beta \rho_i) \exp(\gamma T);$$

ε_{ij} – тензор деформацій повзучості;

$\sigma_{ij}, s_{ij}, \rho_{ij}$ – тензори повних, активних і додаткових напружень, причому $\sigma_{ij} = s_{ij} + \rho_{ij}$;

σ_i, s_i, ρ_i – інтенсивності відповідних напружень;

ω, ψ_v – скалярний і векторний феноменологічні структурні параметри, що відповідають за внутрішньо- і міжзеренне накопичення пошкоджень;

A_* – питома енергія в'язкого руйнування;

σ_e – еквівалентне напруження, що діє на площині з нормаллю v ;

T – температура.

Функції $H(\sigma_i)$, $Q(\sigma_e)$, $\alpha(\sigma_i)$ і константи $a, b, \beta, \gamma, \delta$ визначаються за експериментальними даними.

Штрихами позначені девіатори напружень. Векторний параметр $\bar{\psi}$ описує

міжзеренні пошкодження по границях зерен металу, що викликані напруженнями відриву, які призводять до крихкого руйнування. Приймається, що міжзеренні пошкодження не впливають на процеси повзучості і внутрішньозеренного пошкодження.

За методикою [15], створеною авторами, отримуються параметри рівнянь (1-3), що задовільно описують криві повзучості гладких зразків до їх руйнування.

Якщо при розрахунку кінетики тріщини критичного значення досягає скалярний параметр ω , то руйнування матеріалу вважається переважно в'язким, а якщо цього значення досягає векторний параметр $\bar{\Psi}$, то руйнування є переважно крихким.

Враховуючи, що у вершині тріщини має місце складний напружений стан, актуальним є вибір критерію для визначення еквівалентних напружень σ_e (3), які відповідають за крихке руйнування. В даній роботі еквівалентні напруження визначаються за критерієм Писаренка-Лебедева [16]

$$\sigma_e = \chi \sigma_i + (1 - \chi) \sigma_1, \quad (4)$$

де σ_1 – максимальне розтягуюче напруження;

χ – параметр ($0 \leq \chi \leq 1$).

При $\chi=0.5$ критерій (4) переходить в критерій Сдобирєва, який, згідно з деякими дослідженнями [3] задовільно описує довготривалу міцність при складному напруженому стані гладких зразків. Подальші розрахунки показали, що параметр χ суттєво впливає на кінетику тріщини.

Досліджувалася кінетика тріщини у пластині зі сталі 25X1M1Ф (P2MA), для якої при температурі $T=525$ °C є експериментальні дані про повзучість зразків аж до руйнування та залежності швидкості росту тріщини від коефіцієнта інтенсивності напружень в умовах повзучості.

Пластина з розрізом (початковою тріщиною) довжиною 20 мм розтягувалася з напруженнями $\sigma=150$ МПа. Розміри симетричної частини пластини і дискретизація на скінченні елементи в районі розрізу схематично зображені на рис. 1.

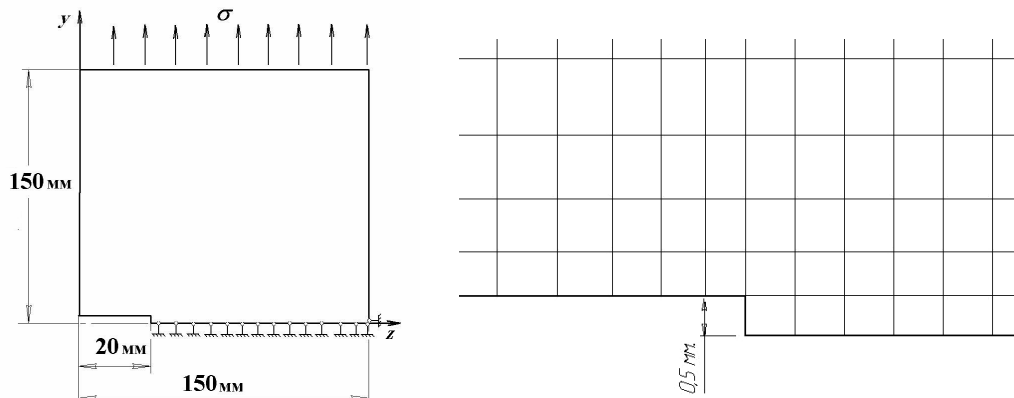


Рисунок 1. Розрахункова схема пластини

Модуль пружності й коефіцієнт Пуассона сталі P2MA при $T=525$ °C приймалися відповідно $183 \cdot 10^3$ МПа і 0,3 [17].

В таблиці 1 наведено значення інтенсивності напружень σ_i , що отримані з кривої деформування відповідно до інтенсивності пластичних деформацій ϵ_i^p .

Таблиця 1. Характеристики $\sigma_i(\epsilon_i^p)$ для сталі P2MA

σ_i , МПа	300	360	400	420	460
$\epsilon_i^p \cdot 10^{-3}$	0	0,6	2,0	4,0	10

Криві повзучості сталі Р2МА, зображені на рис. 2, відповідають залежностям (1-3) зі значеннями параметрів $a = 4,0 \cdot 10^{-10}$ год⁻¹, $b = 4,0 \cdot 10^{-4}$ МПа/год, $\beta = 0,04545$ МПа⁻¹, $k = 2,327 \cdot 10^{-2}$ МПа⁻¹, $\gamma = \delta = 0$, та наведеними в таблиці 2.

Квадратиками і хрестиками на рисунку 2 позначені експериментальні дані повзучості зразків, які отримані з робіт [18, 19]. Хрестикам відповідають значення деформацій повзучості при в'язкому руйнуванні. Цифрами біля кривих позначені напруження в МПа.

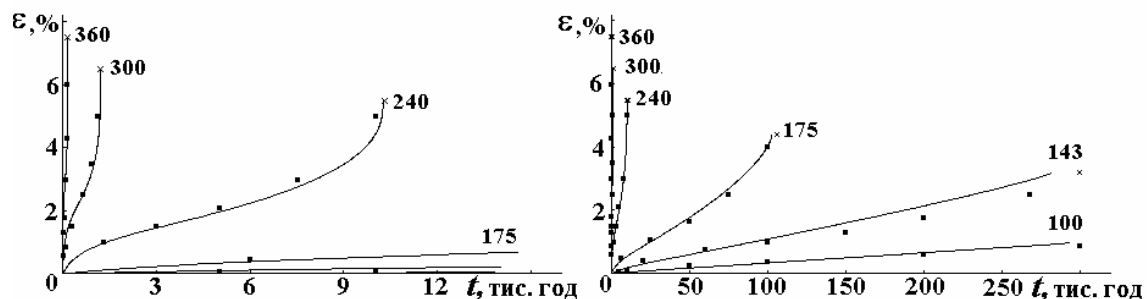


Рисунок 2. Криві повзучості сталі Р2МА при 525 °С

Таблиця 2. Залежність параметрів повзучості від напруження σ_i

σ_i , МПа	100	143	175	240	300	360
$H \cdot 10^{-3}$, МПа	15,0	12,0	7,0	5,0	4,5	4,5
$A \cdot 10^{-6}$, Дж/м ³	1,35	4,99	7,70	13,2	19,5	27,0
α	0,08	0,15	0,5	1,55	2,6	3,5
$Q \cdot 10^7$, год ⁻¹	1,414	1,172	1,180	1,227	1,172	1,052

Розглядалася кінетика тріщини в пластині з використанням математичних моделей, що описують плоский напружений стан, плоску деформацію з $\epsilon_x = 0$, узагальнену плоску деформацію з $\epsilon_x = \text{const}$ і тривимірний напружений стан. Результати розрахунків з використанням двовимірних моделей наведено на рис. 3, де по осі абсцис відкладено час t , а по осі ординат – довжина тріщини L .

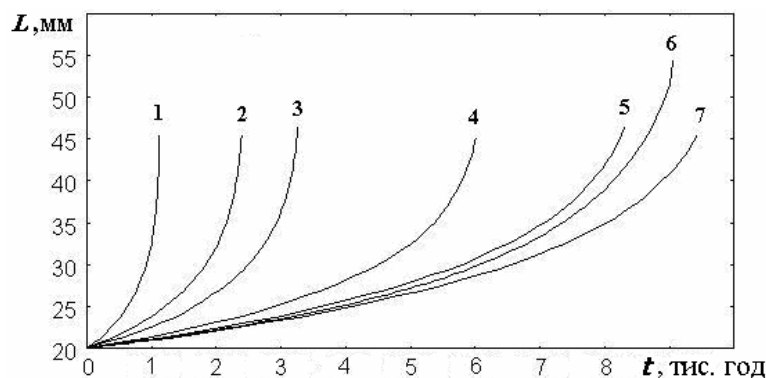


Рисунок 3. Залежність довжини тріщини від часу при $\sigma = 150$ МПа, що отримані за різними розрахунковими моделями

Крива 1 відповідає результатам розрахунків за моделлю плоского напруженого стану; 2, 4, 5, 7 – узагальненої плоскої деформації з $\epsilon_x = \text{const}$; 3 – плоскої деформації з $\epsilon_x = 0$. У всіх розглянутих випадках при розрахунках досягалося значення параметра $|\bar{\psi}| = 1$, що відповідає крихкому руйнуванню.

Для порівняння результатів, отриманих за моделлю узагальненої плоскої деформації (криві 2, 4, 5, 7) на рис. 3 наведено (крива 6) дані розрахунків, виконаних

на основі положень механіки крихкого руйнування за методикою [14] на основі рівняння Періса $\frac{dL}{dt} = CK_1^m$ з параметрами $C = 6,027 \cdot 10^{-10}$ (МПа·м^{1/2})^{-m} · тис. год/м, $m=3,733$ для сталі Р2МА при 525 °С (за даними ВТІ, м. Москва).

Криві 2, 5, 7 отримані з використанням даних розрахунків пластичності за моделлю узагальненої плоскої деформації при значеннях χ в (4) відповідно 0,5, 0,68 і 0,7. Із цих даних випливає, що підбором параметра χ можна наблизити дані розрахунків до кривої 6.

Крива 4 отримана за результатами розв'язання задачі теорії пружності за моделлю узагальненої плоскої деформації з $\chi=0,68$. Без урахування пластичної деформації час до руйнування зменшується в порівнянні з 5 рис. 3 за рахунок напружень у вершині тріщини, які перевищують границю міцності матеріалу. При таких напруженнях за рівняннями (1–3) отримується велика швидкість протікання процесів повзучості й пошкодження матеріалу, але внаслідок швидкої релаксації напружень це не призводить до значного зменшення часу до руйнування. Відзначимо, що похибки екстраполяції параметрів повзучості в області високих напружень (властивості повзучості матеріалу отримуються експериментально при напруженнях, значно нижчих за границю текучості) суттєво впливають на вказані процеси. Розв'язання задачі теорії пластичності дає більш реальний розподіл напружень у вершині тріщини, а за рахунок зниження рівня напружень зменшуються похибки екстраполяції параметрів повзучості.

Криві 1,2 і 3 отримані при розрахунках пластини з урахуванням пластичної деформації при $\chi=0,5$ відповідно за моделями плоского напруженого стану і плоскої деформації з $\varepsilon_x = \text{const}$ і $\varepsilon_x = 0$.

З порівняння кривих 2 і 3 випливає, що при плоскій деформації з $\varepsilon_x = 0$ живучість пластини збільшується приблизно в 1,5 раза за рахунок виникнення значних позитивних напружень σ_x по всій пластині в напрямку її товщини, які зростають зі зростанням деформацій пластичності й повзучості. Внаслідок цього зменшується σ_i і уповільнюються процеси повзучості і внутрішньозеренного пошкодження матеріалу. Таким чином, розрахунки живучості пластин за моделлю плоскої деформації з $\varepsilon_x = 0$ дають завищений час до руйнування. Уникнути цього можна, якщо розглянути задачі за моделлю узагальненої плоскої деформації з $\varepsilon_x = \text{const}$, де напруження σ_x інтегрально дорівнюють нулю.

У випадку використання моделі плоского напруженого стану (крива 1) має місце найбільше значення інтенсивності напружень, що призводить до інтенсифікації процесів повзучості і внутрішньозеренного пошкодження матеріалу ($\omega=45-70$ % при $|\bar{\psi}|=1$), що прискорює крихке руйнування. При використанні моделі плоскої деформації доля внутрішньозеренного пошкодження матеріалу значно менше ($\omega < 30$ %) і практично не впливає на розвиток міжзеренних пошкоджень. Інтенсивність деформацій повзучості при руйнуванні за моделлю плоского напруженого стану складає близько 5 %, а узагальненої плоскої деформації – 1,1–1,5 %. Інтенсивність деформацій пластичності змінюється в межах від 0,2 до 1,7 % за моделлю плоского напруженого стану і від 0,2 до 0,9 % за моделлю узагальненої плоскої деформації. При цьому інтенсивність деформацій пластичності спочатку зменшується за рахунок релаксації напружень при повзучості, а потім зростає зі зростанням тріщини.

На рис. 4 наведено дані про розвиток тріщини в пластині при пружнопластичному деформуванні, що розтягується з напруженнями $\sigma=100$ МПа з використанням моделі узагальненої плоскої деформації з $\chi=0,5$ (крива 1) і $\chi=0,68$ (крива 3). Крива 2 відповідає розрахункам у рамках положень механіки крихкого руйнування з використанням рівняння Періса [14].

Підбором коефіцієнта χ можна наблизитися до даних розрахунків за методикою [14] (крива 2), але при менших значеннях χ , ніж при вибраних для напруження 150 МПа.

Дані рисунків 3, 4 свідчать про те, що наближення результатів, що отримані з використанням положень механіки крихкого руйнування і механіки розсіяних пошкоджень, можна досягти за рахунок коефіцієнта χ , який залежить не тільки від виду напруженого стану, а й рівня навантаження, що визначає розмір зони пластичності у вершині тріщини.

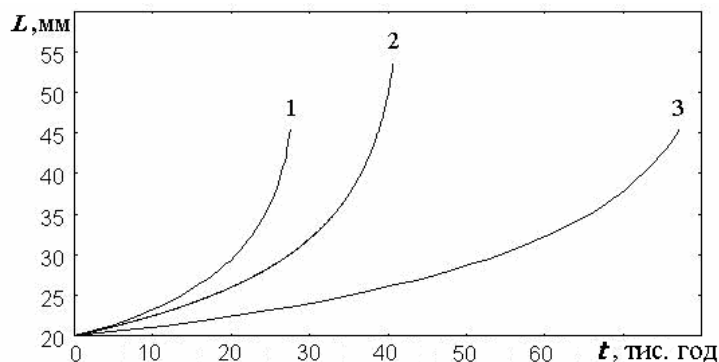


Рисунок 4. Залежність довжини тріщини від часу за моделлю узагальненої плоскої деформації при $\sigma=100$ МПа

У рамках тривимірної пружнопластичної задачі з $\chi=0,68$ було розглянуто одну четверту симетричну частину пластини з наступними граничними умовами симетрії: в серединній площині ($x=0$) – $u_x=0$, $\tau_{xy}=\tau_{xz}=0$, а в площині $y=0$ – $u_y=0$, $\tau_{yz}=\tau_{yx}=0$. Товщина пластини h дорівнювала 1 і 10 мм.

У випадку тонкої пластини ($h=1$ мм) напруження у вершині тріщини близькі до напружень, що отримані з використанням моделі плоского напруженого стану. Напружений стан у вершині тріщини товстішої пластини при $x=0$ мало відрізняється від того, що отриманий за моделлю узагальненої плоскої деформації. Напружений стан біля поверхні $x=h/2$, де $\sigma_x=0$, не співпадає з тим, що отриманий за моделлю плоского напруженого стану.

Міжзеренне пошкодження матеріалу у вершині тріщини досягає критичної величини спочатку в точці $x=0$, а потім в елементах далі від серединної поверхні. При товщині пластини $h=10$ мм довжина тріщини під час росту для $x=0$ приблизно на 1,5 мм більша, ніж біля поверхонь $x=\pm h/2$. Час живучості пластини сягає 1430 годин, що відповідає результатам, які отримані за моделлю плоского напруженого стану (1370 годин). Параметр внутрішньозеренного пошкодження зростає з розвитком тріщини і дорівнює 25-37%. При цьому інтенсивність деформацій повзучості під час руйнування складає 2,5-3,2% і зростає зі зростанням тріщини.

Висновки. Виконані дослідження показують, що кінетика тріщини в пластині залежить від виду математичної моделі, що використовується для опису напружено-деформованого стану. При цьому на результат суттєво впливає врахування деформацій пластичності у вершині тріщини.

Запропонована методика визначення кінетики тріщин при повзучості з використанням положень механіки розсіяних пошкоджень дозволяє враховувати геометрію об'єкта, складний напружений стан, історію навантаження. При визначенні параметрів моделі повзучості й пошкодження матеріалу не використовуються дані щодо тріщиностійкості спеціальних зразків з тріщинами, а лише дані експериментальних досліджень гладких лабораторних зразків, доведених до руйнування при повзучості.

Робота може бути розвинена для подальшого оцінювання кінетики тріщин в інших елементах машин з апробацією результатів на основі використання відомих експериментальних даних.

Література

1. Панасюк, В.В. Механика квазихрупкого разрушения материалов [Текст] / В.В. Панасюк. – К.: Наук. думка, 1991. – 416 с.
2. Сиратори, М. Вычислительная механика разрушения [Текст] / М. Сиратори, Т. Миеси, Х. Мацусита. – М.: Мир, 1986. – 334 с.
3. Локошенко, А.М. Моделирование процесса ползучести и длительной прочности металлов [Текст] / А.М. Лукошенко. – М.: МГИУ, 2007. – 264 с.
4. Механика разрушения и прочность материалов: справ. пособие в 4 т.; / под общей ред. Панасюка В.В. Т. 3: Характеристики кратковременной трещиностойкости материалов и методы их определения [Текст] / С.Е Ковчик, Е.М. Морозов. – Киев: Наук. думка, 1988. – 436 с.
5. Nayhurst D.R. Estimates of the creep rupture lifetime of structures using the finite element method / D.R. Nayhurst, P.R. Dimmer and M.W. Chernuka // J. Mech. Phys. Solids.– 1975. –V. 23.– P. 335–355.
6. Nayhurst D.R. The use of continuum damage mechanics on creep analysis for design // J. Strain Anal. – 1994. – 29, №3. – P. 123 – 240.
7. Murakami S. Computational method for creep fracture analysis by damage mechanics / S. Murakami, Y. Liu, M. Mizuno // Comput. Methods Appl. Mech. – 2000. – 183.–P. 15–33.
8. Hall F.R. Modelling of grain size effects in creep crack growth using a non-local continuum damage approach / F.R. Hall, D.R. Nayhurst // Proc. R. Soc Lond. –1991.– 433, A. –P. 405 – 421.
9. Численное моделирование процессов зарождения и развития трещин на основе соотношений механики поврежденной среды [Текст] / С.А. Капустин, В.А. Горохов, В.Ю. Пантелеев, Ю.А. Чурилов // Проблемы прочности и пластичности. – 2009. – Вып. 71. – С. 36–41.
10. Определение ресурса лопатки газовой турбины в условиях ползучести на основе континуальной механики разрушения [Текст] / В.А. Баженов, А.И. Гулярь, С.О Пискунов, А.А Шкрыль // Проблемы прочности. – 2006. – № 4. – С. 87–93.
11. Шульженко, Н.Г. Оценка длительной прочности роторов паровых турбин на основе анализа рассеянных повреждений [Текст] / Н.Г. Шульженко, П.П. Гонтаровский, Ю.И. Матюхин // Проблемы машиностроения. – 2007. – 10, № 4. – С. 71 – 81.
12. Расчетная оценка длительной прочности дисков ротора паровой турбины [Текст] / Н.Г. Шульженко, П.П. Гонтаровский, Ю.И Матюхин, Н.Г. Гармаш // Проблемы прочности. – 2010. – № 4. – С. 77–86.
13. Задачи контактного взаимодействия элементов конструкций [Текст] / А.Н. Подгорный, П.П. Гонтаровский, Б.Н. Киркач и др. – К.: Наук. думка, 1989. – 232 с.
14. Шульженко, Н.Г. Задачи термпрочности, вибродиагностики и ресурса энергетических агрегатов [Текст] / Н.Г. Шульженко, П.П. Гонтаровский, Б.Ф. Зайцев.– Харьков: ХНАДУ, 2011.– 444 с.
15. Разработка теоретических моделей и вычислительных средств анализа динамической и длительной прочности энергомашиностроительных конструкций. Кн. 2: Отчет о НИР/ ИПМаш НАН Украины; Рук. А.Н. Подгорный. – № 01910026712. – Харьков, 1995. – 304 с.
16. Писаренко, Г.С. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии [Текст] / Г.С. Писаренко, А.А. Лебедев. – Киев: Наук. думка, 1976. – 395 с.
17. Детали паровых стационарных турбин. Расчет на малоцикловую усталость: РТМ 108.021.103-85. – М.: НПО ЦКТИ, 1986. – 50 с.
18. Костюк, А.Г. Прочность цельнокованых роторов турбин мощностью 200, 300 и 800 МВт производства ЛМЗ при длительном статическом нагружении [Текст] / А.Г. Костюк, А.Д. Трухний // Теплоэнергетика. – 2004. – № 10. – С. 45–52.
19. Котли, турбіни і трубопроводи теплових електростанцій. Властивості сталей теплоенергетичного устаткування: проект стандарту. – Київ: Міністерство палива та енергетики України, 2008. – 263 с.