

дого тела с полостями, содержащими жидкость. – Киев: Наукова думка, 1990. – 296 с. 3. *Kubenko V.D., Koval'chuk P.S.* Nonlinear problems of the dynamics of elastic shells partially filled with a liquid // Intern. Appl. Mech. – 2000. – 36, № 4. – P. 421–448. 4. *Богоряд И.Б., Дружинин И.А., Дружинина Г.З., Либин Э.Е.* Введение в динамику сосудов с жидкостью. – Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1977. – 144 с. 5. *Мокеев В.В.* О решении матричных уравнений при конечно-элементном моделировании жидкости по Лагранжу в задачах гидроупругости // Динамика, прочность и износостойкость машин. – 1999. – № 6. – С.11-17. 6. *Кантор Б.Я., Стрельникова Е.А.* К теории собственных колебаний конструкций, содержащих жидкость // Доп. НАН України. – 2001. – № 10. – С. 61-65. 7. *Валландер С.В.* Лекции по гидроаэромеханике. – Л.: Изд-во Ленинград. ун-та, 1978. – 296 с. 8. *Михлин С.Г.* Курс математической физики. – М.: Физматгиз, 1968. – 576 с. 9. *Бреббия К., Теллес Ж., Вроубел Л.* Методы граничных элементов. – М.: Мир, 1987. – 524 с. 10. *Еселева Е.В., Гнистько В.И., Стрельникова Е.А.* Собственные колебания сосудов высокого давления при взаимодействии с жидкостью // Пробл. машиностроения. – 2006. – № 1. – С. 105-118. 11. *Гнистько В.И., Мерзляков В.А.* Расчет неосесимметричного термоупругопластического состояния разветвленных оболочек вращения полуаналитическим методом конечных элементов // Прикл. механика. – 2002. – 38, № 8. – С.105-115.

Поступила в редколлегию 01.03.2006

УДК 539.434

Є.М. ГОРАШ, НТУ «ХП»

ЗАСТОСУВАННЯ ІЗОТРОПНОЇ ТА АНІЗОТРОПНОЇ КОНЦЕПЦІЙ ПОШКОДЖУВАНОСТІ ДО РОЗРАХУНКУ ТРИВАЛОЇ МІЦНОСТІ РОТОРУ ПАРОВОЇ ТУРБИНИ В УМОВАХ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ПОВЗУЧОСТІ

У рамках дослідницької роботи дві типові моделі поведіння матеріалу, які описують ізотропну й анізотропну повзучість з урахуванням пошкоджуваності в металах і сплавах, застосовані для симуляції механічного поведіння ротора парової турбіни в його експлуатаційних умовах. Чисельні рішення початково-крайових задач одержують за допомогою МСЕ, використовуючи твердотільні вісесиметричні скінчені елементи. З метою адекватного розрахунку тривалої міцності обидві моделі повзучості були імплементовані в СЕ код програмного комплексу ANSYS. Отримані для ротора парової турбіни результати показують істотну залежність часу життя конструкції від типу моделі матеріалу.

Within the framework of the research work two typical material models describing isotropic and anisotropic creep-damage processes in metals and alloys are applied to the simulation of the mechanical behaviour of a steam turbine rotor in its service conditions. Numerical solutions of the initial-boundary value problems have been obtained by FEM using solid axisymmetrical type finite elements. For the purpose of adequate long-term strength analysis both isotropic and anisotropic creep-damage models have been implemented in FE-code of the universal CAE ANSYS. Obtained simulation results for a steam turbine rotor show the significant sensitivity of life-time assessment to the type of material model.

Огляд моделей високотемпературної повзучості. Повзучість супроводжується залежними від часу деформаціями й процесами пошкодження мікроструктури матеріалу конструкції, які включають зародження й ріст мікро-

скопичених тріщин і порожнин. Для того, що б належним чином охарактеризувати розвиток пошкодження матеріалу, та одночасно описати збільшення швидкості деформації повзучості протягом третьої стадії повзучості (стадія прискорюваної повзучості), була заснована механіка пошкоджуваності суцільного середовища, що продемонструвала свою спроможність, як потужного підходу до вивчення даного явища [1].

Велика кількість прикладів застосування механіки пошкоджуваності суцільного середовища пов'язана з прогнозами тривалої міцності конструктивних елементів електростанцій та хімічних об'єктів: 1) тонкостінні конструкції, такі як системи трубопроводів і коліна труб [2, 3], елементи силового устаткування та турбодвигунів [4, 5]. Попередні дослідження з пошкоджуваності при повзучості поперечно навантажених оболонок і пластин, такі як [6, 7], зазвичай беруть за основу ізотропну скалярну перемінну пошкоджуваності, запропоновану Качановим [8] і Работновим [9]. Концепція ізотропної пошкоджуваності добре підходить для опису поведінки пошкоджуваності при повзучості для деяких матеріалів, таких як сталі й алюмінієві сплави [10], і застосовна для простих напружених станів, які звичайно мають місце при одноосьових випробуваннях на повзучість [11]. У загальному випадку реалізації складних напружених станів за допомогою постійних або циклічних умов навантаження утворення порожнин відбувається на кордонах зерен, що може призвести до реалізації анізотропної третьої стадії повзучості з істотною залежністю від орієнтації навантаження. Анізотропна поведінка, що зумовлена пошкоджуваністю, спостерігалася в експериментах на повзучість під впливом непропорційного навантаження [12] або в експериментах з попередньо пошкодженими зразками для різних напрямків навантаження [13]. Внаслідок того, що природа пошкоджуваності, як правило, анізотропна, то явище ізотропної пошкоджуваності матеріалу варто розглядати як окремий випадок анізотропії пошкоджуваності. І навпаки, моделі ізотропної пошкоджуваності можуть бути розширені до моделей, які припускають пошкоджуваність, викликану анізотропією [14, 15].

Метою даної статті є визначення основних принципів ефективного застосування концепцій ізотропної та анізотропної пошкоджуваності до чисельних розрахунків тривалої міцності елементів конструкцій силового устаткування електростанцій в умовах високотемпературної повзучості на прикладі ротору секції високого тиску парової турбіни. Для порівняння ізотропної та анізотропної концепцій пошкоджуваності в розрахунках тривалої міцності ротору парової турбіни ми використовуємо класичну модель повзучості Качанова-Работнова-Хейхьорста [1] з урахуванням ізотропної пошкоджуваності, а також розширення цієї моделі за допомогою тензору пошкоджуваності другого рангу, тобто модель Мураками-Оно [16]. Ці обидві моделі потребують однакового набір констант повзучості [17]. З метою адекватного моделювання повзучості та розрахунку часу життя за допомогою МСЕ обидві зазначені моделі повзучості були імплементовані в інженерний програмний комплекс ANSYS за допомогою приєднаних підпрограм [18], що розробляються користува-

чем та програмується на мові FORTRAN.

Ізотропна модель повзучості. Розглянемо докладно найбільш використовувану в розрахунках ізотропну модель повзучості з урахуванням пошкоджуваності – модель Качанова-Работнова-Хейхьорста [1,8,9]. Внутрішні перемінні стану матеріалу і конкретна форма потенціалу повзучості для ізотропної поведінки матеріалу при повзучості можуть бути обрані, базуючись як на відомих механізмах деформації повзучості та еволюції пошкоджуваності, так і на можливостях проведення експериментальних вимірів та застосування для інженерних задач, наприклад [19]. Відповідно до відомих механізмів деформації швидкість деформації повзучості на першій та другій стадіях повзучості керується переважно інтенсивністю напружень за фон Мізесом. А на стадію прискорення повзучості має вплив ще і вид напруженого стану.

Перший крок при феноменологічному моделюванні повзучості являє собою формулювання емпіричних функцій, що описують чутливість мінімальної швидкості повзучості впродовж стадії сталої повзучості до рівня напружень та температури. Наступним кроком є модифікація функцій мінімальної швидкості повзучості за допомогою впровадження підходящих параметрів зміцнення та пошкоджуваності. Класична ізотропна концепція Качанова-Работнова-Хейхьорста [20] опирається на степеневу експоненціальну залежність для функції напружень та скалярний параметр пошкоджуваності. При цьому визначальне рівняння сталої повзучості для тензора швидкості деформації повзучості має вигляд [17]:

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{cr} = \frac{3}{2} \frac{\dot{\epsilon}_{екв}^{cr}}{\sigma^{vM}} S_{ij}^s \quad \text{та} \quad \dot{\epsilon}_{екв}^{cr} = A \left(\frac{\sigma^{vM}}{1-\omega} \right)^n, \quad (1)$$

де інтенсивність напружень за фон Мізесом має вигляд:

$$\sigma_{vM} = \left[\frac{3}{2} \mathbf{s} \cdot \mathbf{s} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (2)$$

А еволюційне рівняння для скалярного параметру пошкоджуваності може бути сформульовано наступним чином:

$$\dot{\omega} = B \left(\frac{\langle \sigma_{екв}^{\omega} \rangle}{(1-\omega)} \right)^m, \quad 0 \leq \omega \leq \omega_{*}. \quad (3)$$

В цих формулах $\dot{\epsilon}_{ij}^{cr}$ – компоненти тензора швидкості деформації повзучості ($i, j = 1, 2, 3$), \mathbf{s} – девіатор тензора напружень та його компоненти S_{ij}^s ($i, j = 1, 2, 3$), A, B, n, m – константи повзучості матеріалу, ω – ізотропний параметр пошкоджуваності ($0 < \omega < 1$), і $\sigma_{екв}^{\omega}$ – еквівалентне напруження, що використовується в формі, запропонованій в [20]:

$$\sigma_{екв}^{\omega} = \alpha \sigma_I + (1-\alpha) \sigma^{vM}, \quad (4)$$

де σ_I – максимальне позитивне значення головних напружень, α – ваговий коефіцієнт або коефіцієнт впливу, що дозволяє визначити величину впливу головних механізмів пошкоджуваності на еволюцію пошкоджуваності (пе-

реважно визначається напруженнями – або σ_I або σ^{VM}).

Наведені вище рівняння моделі повзучості з пошкоджуваністю (1-3) виконують умову нестисливості. Тобто еволюція пошкоджуваності відбувається тільки при розтягувальному напруженні, і, отже, ніякої пошкоджуваності немає під дією стискального напруження:

$$\langle \sigma_{екв}^{\omega} \rangle = \sigma_{екв}^{\omega} \quad \text{для} \quad \sigma_{екв}^{\omega} > 0 \quad \text{та} \quad \langle \sigma_{екв}^{\omega} \rangle = 0 \quad \text{для} \quad \sigma_{екв}^{\omega} \leq 0. \quad (5)$$

Анізотропна модель повзучості. Розглянемо концепцію анізотропної пошкоджуваності, запропоновану С. Мураками та Н. Оно для того, щоб зробити висновки про вплив анізотропії, що викликана пошкоджуваністю, на результати аналізу тривалої міцності. До теперішнього часу не існує єдиного феноменологічного підходу в моделюванні повзучості з анізотропією, викликаною пошкоджуваністю через обмежену кількість експериментальних даних, які дозволяють перевірити вірність анізотропних моделей повзучості. Моделі анізотропної пошкоджуваності в основному сформульовані з використанням поняття тензора ефективних напружень [21].

Роблячи припущення, що головний механічний вплив повзучості з пошкоджуваністю має місце в результаті зменшення ефективної площі поперечного перетину, яке обумовлене утворенням порожнин на границях зерен у матеріалах, С. Мураками та Н. Оно [16] описали пошкоджений стан за допомогою симетричного тензора пошкоджуваності 2-го рангу Ω , що визначається тривимірною щільністю площі порожнин, і розробили теорію суцільного середовища стосовно повзучості з урахуванням пошкоджуваності для металів і сплавів. Тензор напружень σ збільшить своє значення і перетвориться на тензор ефективних напружень наступним чином:

$$\tilde{\sigma} = \frac{1}{2}(\sigma \cdot \Phi + \Phi \cdot \sigma), \quad \text{з урахуванням} \quad \Phi = [I - \Omega]^{-1}, \quad (6)$$

де I являє собою одиничний тензор другого рангу, а Ω – це симетричний тензор пошкоджуваності другого рангу.

Результати металографічних спостережень у міді та сталях показують, що порожнини, викликані повзучістю з пошкоджуваністю, розвиваються переважно на границях зерен, перпендикулярно максимальним розтягувальним напруженням [22]. Якщо припустити, що зменшення ефективної площі поперечного перерізу внаслідок формування порожнин відбувається переважно на площинах, перпендикулярних напрямку максимального розтягувального ефективного напруження $\tilde{\sigma}_I$, і швидкість цього формування порожнин керується величиною еквівалентного напруження, то аналогічно концепції повзучості з ізотропною пошкоджуваністю (1-3) можна сформулювати наступні рівняння:

$$\sigma_{\Omega}^{екв} = \alpha \tilde{\sigma}_I + (1 - \alpha) \tilde{\sigma}_{VM}, \quad \tilde{\sigma}_{VM} = \left[\frac{3}{2} \tilde{s} \cdot \tilde{s} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (7)$$

$$\langle \sigma_{\Omega}^{екв} \rangle = \sigma_{\Omega}^{екв} \quad \text{для} \quad \sigma_{\Omega}^{екв} > 0, \quad \langle \sigma_{\Omega}^{екв} \rangle = 0 \quad \text{для} \quad \sigma_{\Omega}^{екв} \leq 0,$$

де \hat{s} позначає девіатор тензору ефективних напружень $\hat{\sigma}$, а $\hat{\sigma}_I$ — це максимальне позитивне значення $\hat{\sigma}$, тобто перше головне ефективне напруження. Еволюційне рівняння для тензору пошкоджуваності може бути сформульоване наступним чином:

$$\dot{\Omega} = B \left[\langle \sigma_{\Omega}^{cr} \rangle \right]^k \left[tr(\Phi \cdot n_I \otimes n_I) \right]^{k-1} n_I \otimes n_I, \quad (8)$$

де n_I — це головний напрямок, що відповідає першому головному напруженню $\hat{\sigma}_I$. З метою описання деформації пошкоджених матеріалів, що одночасно залежить і від зменшення ефективної площі поперечного перерізу і від відповідного об'ємного перерозподілу напружень, С. Мураками запропонував увести модифікований тензор напружень $\hat{\sigma}$ у визначальні рівняння повзучості пошкоджених матеріалів [16]. Якщо припустити, що відносна частка площі перерізу порожнин у матеріалі досліджуваної конструкції мала, і врахувати умову, що в непошкодженому стані модифікований тензор напружень $\hat{\sigma}$ повинен збігатися за значенням з σ , то $\hat{\sigma}$ варто припустити наступним чином:

$$\hat{\sigma} = \alpha_s \sigma + \frac{1}{2} \beta_s (\sigma \cdot \Phi + \Phi \cdot \sigma) + \frac{1}{2} (1 - \alpha_s - \beta_s) (\sigma \cdot \Phi^2 + \Phi^2 \cdot \sigma), \quad (9)$$

де α_s, β_s — це константи повзучості матеріалу. Якщо підставити модифікований тензор напружень $\hat{\sigma}$, та його девіаторну частину \hat{s} в рівняння закону Нортон, то визначальне рівняння повзучості з урахуванням анізотропного характеру пошкоджуваності може бути записане в наступному вигляді [17]:

$$\dot{\epsilon}^{cr} = \frac{3}{2} \frac{\dot{\epsilon}_{cr}^{cr}}{\hat{\sigma}_{vM}} \hat{s} \quad \text{та} \quad \dot{\epsilon}_{cr}^{cr} = A (\hat{\sigma}_{vM})^n, \quad (10)$$

де модифікована інтенсивність напружень за фон Мізесом:

$$\hat{\sigma}_{vM} = \left[\frac{3}{2} \hat{s} \cdot \hat{s} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (11)$$

Дослідження тривалої міцності ротору парової турбіни. В регулюючому ступені та першому компресорному ступені турбінної секції високого тиску парової турбіни К-500-166-1 потужністю 500 МВт (див. рис. 1) температура водяної пари значно вища за температуру пари в інших ступенях. Тому необхідно дослідити тривалу міцність ротору секції високого тиску та час життя до руйнування внаслідок незворотного процесу накопичення мікропошкоджень та мікротріщин через високотемпературну повзучість в матеріалі ротору — жароміцній високолігвованій сталі марки G-X 12CrMoWVNbN-10-11 (ливарна сталь 91). Досліджуваний ротор належить паровій турбіні моделі К-500-166-1 виробництва Радянського Союзу, що буду зроблена в період між 1977 та 1986 роками на бувшому Ленінградському Металічному заводі у Санкт-Петербурзі (Росія) [23]. У найбільш навантаженому елементі зазначеної турбіни, тобто у роторі секції високого тиску звичайно спостерігаються великі значення температурних градієнтів та отже і температурних напружень.

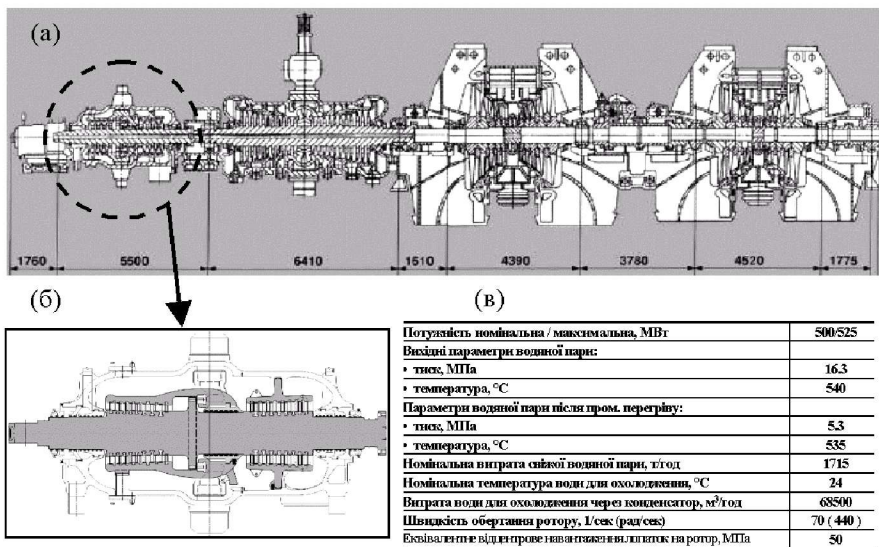


Рисунок 1 – Геометричні параметри та технічні характеристики парової турбіни К-500-166-1: (а) поздовжній переріз турбіни; (б) секція високого тиску турбіни К-500-166-1; (в) технічні параметри турбіни К-500-166-1



Рисунок 2 – Осесиметрична скінчено-елементна модель ротору секції високого тиску з граничними умовами та механічними навантаженнями

Таким чином, час робочої експлуатації парової турбіни К-500-166-1 до виходу із ладу залежить переважно від накопичення пошкоджень унаслідок повзучості у матеріалі конструкційних елементів турбінної секції високого тиску. Усі чисельні розрахунки ротору секції високого тиску, включаючи розрахунок спрощеного статичного температурного поля (див. рис. 3), початкових статичних полів пружних деформацій та напружень (див. рис. 4) та розрахунки повзучості з урахуванням пошкоджуваності (див. рис. 6-8), були виконані у скінчено-елементному програмному комплексі ANSYS. Найбільш підходящі моделі повзучості з урахуванням пошкоджуваності (ізотропна модель Качанова-Работнова-Хейхьорста та анізотропна модель Мураками-Оно), що потребують однаковий набір констант повзучості, були використані для прогнозу робочого часу життя ротору секції високого тиску до моменту руйнування. З метою адекватного моделювання повзучості та пошкоджуваності методом скінчених елементів обидві моделі повзучості були ім-

плементовані у програмний комплекс ANSYS за допомогою приєднаних під-програм, що розробляються користувачем та програмуються на мові COMPAQ VISUAL FORTRAN [18].

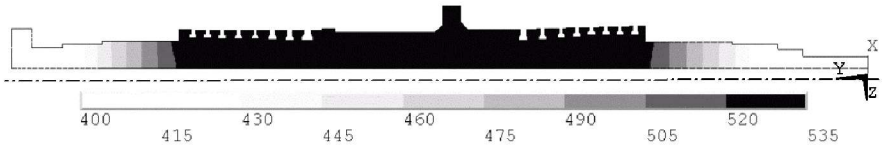


Рисунок 3 – Стационарне температурне поле у роторі турбінної секції високого тиску, °C

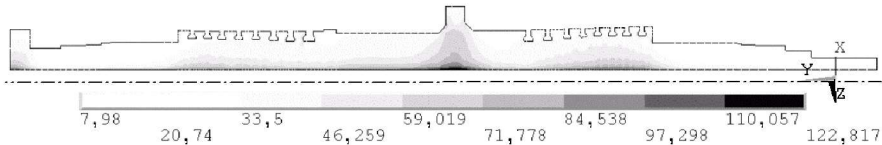


Рисунок 4 – Розподіл інтенсивності напружень за фон Мізеса [МПа] по об'єму ротору секції високого тиску в початковий момент часу

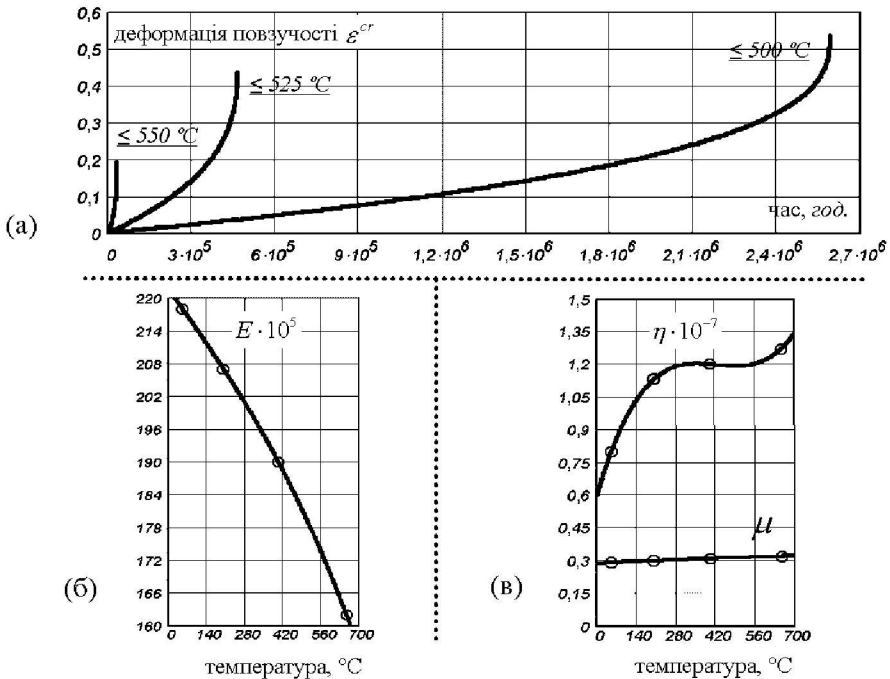


Рисунок 5 – Фізичні властивості сталі G-X 12CrMoWVNbN-10-11: (а) криві повзучості для різних температурних діапазонів; (б) модуль пружності Юнга E [кН/мм²]; (в) об'ємним коефіцієнтом температурного розширення η [K⁻¹] та коефіцієнт Пуассона μ

Вісесиметрична скінчено-елементна модель ротору секції високого тиску з граничними умовами та механічними навантаженнями, що використана для розрахунків на повзучість з урахуванням пошкоджуваності зображена на рис. 2. В скінчено-елементній моделі враховані різні властивості повзучості та пошкоджуваності для трьох областей ротору турбінної секції високого тиску з трьома різними температурними діапазонами: 1) 550-526°C; 2) 525-501°C; 3) 500-400°C (див. рис. 3). Необхідні набори констант повзучості матеріалу ротору, сталі G-X 12CrMoWVNbN-10-11, для послідовності значень робочих температур, що використовуються для розрахунків повзучості і пошкоджуваності методом скінчених елементів, визначені за допомогою методики обробки експериментальних кривих повзучості з використанням лінійної апроксимації методом найменших квадратів (див. табл.).

Температурний діапазон – T , [°C]	Константи повзучості матеріалу			
	A , [Mpa ⁻ⁿ /h]	n	B , [Mpa ^{-m} /h]	m
400 – 500 °C	$3,9863 \cdot 10^{-21}$	6,3797	$2,3977 \cdot 10^{-26}$	8,7618
501 – 525 °C	$1,4541 \cdot 10^{-20}$	6,4384	$1,3327 \cdot 10^{-25}$	8,7629
526 – 550 °C	$8,2795 \cdot 10^{-18}$	5,4794	$3,5020 \cdot 10^{-20}$	6,7843

Ваговий коефіцієнт $\alpha = 0,3$, що визначає вплив першого головного напруження та інтенсивності напружень за фон Мізесом на еволюцію пошкоджуваності, взятий з [24] як усереднене значення для жароміцних сталей, що використовуються для виготовлення конструкційних елементів парових турбін. І остання константа повзучості $\omega_* = 0,9$ (критичне значення скалярного параметру повзучості для ізотропної моделі повзучості або головного значення тензора пошкоджуваності Ω для анізотропної моделі повзучості) має значення, що відповідає критичній межі пошкоджуваності більшості конструкційних сталей.

Одноосові криві повзучості матеріалу ротору для трьох різних температурних діапазонів наведені на рис. 5, а. Ізотропні пружні механічні властивості матеріалу ротору, жароміцної сталі марки G-X 12CrMoWVNbN-10-11, без впливу пошкоджуваності представлені модулем пружності Юнга (див. рис. 5, б), об'ємним коефіцієнтом температурного розширення η та коефіцієнтом Пуассона (див. рис. 5, в), чисельні значення яких були взяті з Інтернет-довідника фізичних властивостей металів та сплавів [25].

У якості результатів розрахунків несталої повзучості за допомогою методу скінчених елементів були отримані два значення розрахункового часу робочого життя ротору секції високого тиску – з урахуванням скалярного параметру пошкоджуваності (див. рис. 6) та з урахуванням тензорного параметру пошкоджуваності (див. рис. 7), а також поля розподілу напружень на деформацій по об'єму ротору під час процесу повзучості, наприклад рис. 8. Значення розрахункового часу робочого життя ротору парової турбіни наступні – 136 486 годин (15,6 років) для ізотропної моделі повзучості Качанова-Работнова-Хейхорста [20] та 183 573 годин (20,9 років) для анізотропної мо-

делі повзучості Муракамі-Оно [16].

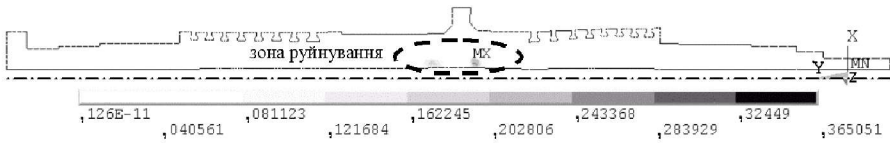


Рисунок 6 – Розподіл скалярного параметру пошкоджуваності ω по об'єму ротору секції високого тиску в останній момент часу перед руйнуванням (ізотропна модель Качанова-Работнова-Хейхорста)

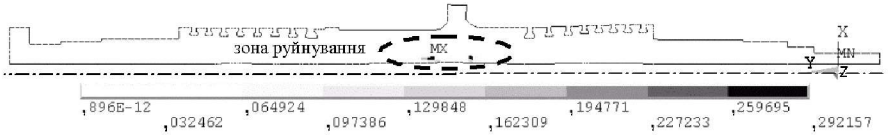


Рисунок 7 – Розподіл першого головного значення тензора пошкоджуваності Ω_I по об'єму ротору секції високого тиску в останній момент часу перед руйнуванням (анізотропна модель Муракамі-Оно)

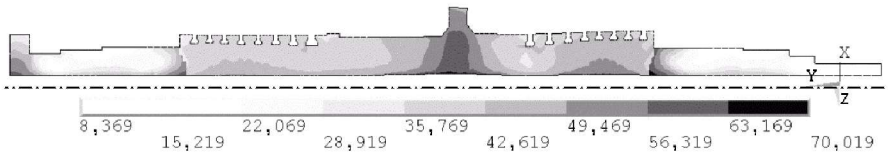


Рисунок 8 – Розподіл інтенсивності напружень за фон Мізесом [МПа] по об'єму ротору секції високого тиску перед руйнуванням

Висновки. Розраховане за допомогою ізотропної моделі повзучості Качанова-Работнова-Хейхорста та скалярного параметру пошкоджуваності значення часу робочого життя ротору секції високого тиску парової турбіни моделі К-500-166-1 на 25 % довше, ніж значення часу робочого життя, визначене за допомогою анізотропної моделі повзучості Муракамі-Оно та тензорного параметру пошкоджуваності. Розрахунковий час робочого життя ротору парової турбіни суттєво залежить від урахування спрямованого характеру пошкоджуваності, який мотивований складним і неоднорідним напружено-деформованим станом зазначеного елемента конструкції. Таким чином, модель повзучості Муракамі-Оно задовільно описує поведінку матеріалу конструкції при повзучості та цілком прийнятна для проведення чисельних розрахунків тривалої міцності методом скінченних елементів, що реалізований в універсальному інженерному програмному комплексі ANSYS.

Список літератури: 1. Hayhurst D.R. Computational continuum damage mechanics: its use in the prediction of creep in structures: past, present and future // Creep in Structures (ed. by Murakami, S. and Ohno, N.). – Dordrecht, Kluwer, 2001. – PP. 175-188. 2. Altenbach H. Creep Analysis of Thin-Walled Structures // ZAMM-Z. Angew. Math. Mech. – 82. – 2002. – PP. 507-533. 3. Naumenko K. On the use of the first order shear deformation models of beams, plates and shells in creep lifetime estimations // Technische Mechanik. – 20(3). –

2000. – PP. 215-226. **4.** *JianPing J., Guanga M., Yi S. and SongBo X.* An effective continuum damage mechanics model for creep-fatigue life assessment of a steam turbine rotor // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – **80**. – 2003. – PP. 389-396. **5.** *Nowak G. and Rusin A.* Lifetime Deterioration of Turbine Components During Start-Ups // OMMI. – Vol. 3, issue 1, April 2004. – PP. 1-10. **6.** *Cocks A. and Leckie F.* Creep rupture of shell structures subjected to cyclic loading // Trans. ASME, J. Appl. Mech. – 1988. – PP. 294-298. **7.** *Altenbach H., Kushnrevsky V. and Naumenko K.* On the use of solid- and shell-type finite elements in creep-damage predictions of thin-walled structures // Arch. Appl. Mech. – 2001. – PP. 164-181. **8.** *Kachanov L.* On rupture time under condition of creep // Izv. Akad. Nauk SSSR, Otd. Tekhn. Nauk. – 1958. – PP. 26-31. **9.** *Rabotnov Y.* Creep Problems in Structural Members // North Holland, Amsterdam, 1969. **10.** *Chaboche J.* Continuum damage mechanics a tool to describe phenomena before crack initiation // Nuclear Engineering and Design. – 1981. – PP. 233-247. **11.** *Murakami S.* A continuum mechanics theory of anisotropic damage // Yielding, damage and failure of anisotropic solids (edited by J. P. Boehler). Mechanical Engineering Publications. – London. – 1990. – PP. 465-482. **12.** *Betten J., El-Magd E., Meydanli S. and Palmen P.* Bestimmung der Materialkennwerte einer drei-dimensionalen Theorie zur Beschreibung des tertiären Kriechverhaltens austenitischer Stähle auf der Basis der Experimente // Arch. Appl. Mech. – **65**. – 1995. – PP. 110-120. **13.** *Murakami S. and Sanomura Y.* Creep and creep damage of copper under multiaxial states of stress // Plasticity today (edited by A. Sawczuk and G. Bianci), Elsevier Appl. Sci. – London. – 1985. – PP. 535-551. **14.** *Cordebois J. and Sidoroff F.* Damage induced elastic anisotropy. Mechanical behaviours of anisotropic solids (edited by J.P. Boehler) // Mattinns Nilhoff. – Boston. – 1983. – PP. 761-774. **15.** *Murakami S. and (Eds.) N.O. lutam* symposium on creep in structures // Kluwer Academic Publishers. – Dordrecht. – 2000. **16.** *Murakami S. and Ohno N.* A continuum theory of creep and creep damage // Creep in structures (edited by A.R.S. Ponter and D.R. Hayhurst). Springer Verlag, Hrsg. – 1981. – PP. 422-443. **17.** *Altenbach H., Huang C.-X., Naumenko K.* Creep-damage prediction in thin-walled structures by use of isotropic and anisotropic damage models // J. Strain Analysis. – 2002. – **37**, no. 3. – PP. 265-275. **18.** ANSYS User's Manual for Revision 5.0. Volume IV. Theory // Edited by Peter Kohnke, PhD., Swanson Analysis Systems, Inc., 1994. – 1266 p. **19.** *Altenbach H.* Creep and damage in materials and structures // CISM Courses and Lectures. – no. 399. – Wein/New York: Springer. – 1999. **20.** *Leckie F.A., Hayhurst D.R.* Constitutive equations for creep rupture // Acta Metall. – **25**. – 1977. – PP. 1059-1070. **21.** *Lemaitre J.* A Course on Damage Mechanics // Springer-Verlag, Berlin. – 1992. **22.** *Hayhurst D.R., Leckie F.E.* High temperature creep continuum damage in metals // Boehler, J.P. (Ed.), Yielding Damage and Failure of anisotropic Solids EGF5. – 1990. – PP. 445-464. **23.** *Hassa R.* The up-to-date turbine pool of VE-G: A guarantor of the competition in the European electricity market // OMMI. – Vol. 2, issue 3, December 2003. – PP. 1-14. **24.** *Hyde T.H., Sun W. and Williams J.A.* Creep analysis of pressurized circumferential pipe weldments – a review // J.Strain Analysis. – Vol. 38, no. 1. – PP. 1-29. **25.** <http://www.edelstahl-witten-krefeld.de> – Інтернет-довідник фізичних характеристик металів та сплавів фірми «Edelstahl Witten-Krefeld GmbH».

Надійшло до редакції 30.03.2006

УДК 539.434

Е.Н. ГОРАШ, С.В. ЛЫСЕНКО, канд.техн.наук;
Г.И. ЛЬВОВ, докт.техн.наук; НТУ «ХПІ»

НЕИЗОТЕРМИЧЕСКАЯ ПОЛЗУЧЕСТЬ И ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ ПАРОВЫХ ТУРБИН

У рамках дослідження традиційна модель механіки руйнування суцільних середовищ Качанова-Работнова-Хейхерста розширена до варіанту, що враховує перемінну температуру та деформаційне зміцнення. Обидві швидкості, як деформації, так і пошкоджуваності, вважаються залежними від температури. Представлена методика обчислення констант повзучості матеріалу, що базується на наявному сімействі експериментальних кривих повзучості. Отримана неізотермічна