

ЛИТЕРАТУРА:

1. Чернета О.Г. Формирование поверхностной структуры поршневых колец лазерным упрочнением / О.Г. Чернета,
2. Коробочка А.Н., Коржавин Ю.А. // Машиностроение и техносфера на рубеже XXI века: Межд. сб. науч. тр. ДонГТУ. – 2000. – Вып. 5. – Т.3. – С. 248-251.
3. Технология конструкционных материалов и материаловедение / И.П. Гладкий, В.И. Мощенок, В.П. Тарабанова, Н.А. Лазарова, Д.Б. Глушкова. – Х.: ХНАДУ, 2014. – 464 с.
4. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов / А.Г. Григорьянц. – М.: Машиностроение, 2009. – 272 с.
5. Матвеев Ю.И. Повышение долговечности деталей с использованием лазерной обработки / Ю.И. Матвеев. – Новгород, 2003. – 329 с.
6. Дзюба Ю.Н. Упрочнение изделий из высокопрочного чугуна / Ю.Н. Дзюба, А.П. Любченко, Д.Б. Глушкова, В.П. Тарабанова // Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр. – 2003. – С. 72–74.
7. Любченко А.П. Влияние температуры отпуска после лазерной закалки на износостойкость поршневых колец / А.П. Любченко, Д.Б. Глушкова, В.П. Тарабанова // Науковий вісник будівництва. - 2011. – Вип.64. - С.407-412.
8. Чернета О.Г. Исследование физико-механических свойств поверхности поршневых колец, обработанных лазером / О.Г. Чернета, А.Н. Коробочка, Н.Н. Козина, А.М. Пустовойт // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Межд. сб. науч. трудов ДонГТУ. – 2001. - Вып. 18. – С.71-75.

УДК 539.3

Савін О.Б., Соболев В.М.

Харківський національний університет будівництва та архітектури

ПОВЗУЧІСТЬ ТА ПОШКОДЖУВАНІСТЬ УЩІЛЬНЕНЬ З ПЛОСКОЮ ПРОКЛАДКОЮ

Вступ. Проблеми оцінювання довготривалої міцності сучасної техніки займають важливе місце при проектуванні, створенні, доведенні й експлуатації машин, приладів і апаратури. Експлуатаційні умови для багатьох конструкцій машинобудівної техніки характеризуються високими рівнями температур і навантажень. В цих умовах внаслідок таких явищ як повзучість та пошкоджуваність проявляються обмеження властивостей міцності й довговічності конструктивних елементів машин. Тому у розрахунках на міцність сучасної високотемпературної техніки особливе місце займають розрахунки на повзучість і довготривалу міцність. Для підвищення достовірності в оцінюванні довговічності конструктивних елементів машин при повзучості, необхідні нові науково обґрунтовані методи оцінювання довговічності.

У науковій літературі міститься значна кількість публікацій, де запропоновані

різні підходи та моделі процесів повзучості й пошкоджуваності матеріалів, здатні з різним ступенем адекватності оцінювати довготривалу міцність конструктивних елементів машин на етапі їх проектування. Більшість з існуючих публікацій вітчизняних й закордонних авторів присвячено дослідженню нелінійних процесів повзучості розв'язку на базі чисельного методу скінчених елементів [1,2]. Практично відсутні розробки на базі чисельно-аналітичних методів. Про актуальність теми роботи свідчить зацікавленість багатьох вітчизняних та закордонних наукових шкіл щодо пошуку ефективних розрахункових методів оцінювання довготривалої міцності конструкцій, які деформуються в умовах повзучості із пошкоджуваністю, та існуючі потреби у методах визначення впливу повзучості на експлуатаційні властивості конструкцій на етапі проектування [1-4, 7].

У роботі розглянуто повзучість ущільнювальних з'єднань із прокладками у

вигляді ущільнювальних кілець прямокутного перерізу з алюмінієвих сплавів, міді і сталі, що забезпечують герметичність корпусу, та є складовою частиною затвору, призначеного для зборки і розбирання з'єднань [5]. Кріпильні елементи затвору сприймають зовнішні навантаження, наприклад, дію робочого середовища, і утримують складові частини затвору в робочому положенні. При високих температурах в ущільнювальних з'єднаннях має місце релаксація контактних напружень і руйнування внаслідок повзучості, що впливає на герметичність з'єднань. Вивчено питання повзучості і релаксації контактних напружень ущільнювальних кілець прямокутного перерізу в умовах взаємодії зі стінками затвору при повному і частковому зчепленні точок контактуючих поверхонь.

Мета і завдання. Метою роботи є розробка розрахункового методу та програмного забезпечення щодо оцінювання довготривалої міцності ущільнювальних з'єднань із прокладками у вигляді ущільнювальних кілець прямокутного перерізу, які експлуатуються при високій температурі й повзучості. Для цього у роботі визначено ряд основних завдань, серед яких: формулювання теоретично обґрунтованої математичної постановки задач повзучості ущільнювальних кілець прямокутного перерізу; створення чисельно-аналітичного методу і програмного забезпечення для розрахунків на довготривалу міцність з урахуванням повзучості та пошкоджуваності ущільнювальних кілець; визначення оцінок довготривалої міцності ущільнювальних кілець прямокутного перерізу, що експлуатуються при дії зовнішніх тисків, високій температурі й повзучості.

Постановка задачі повзучості та пошкоджуваності тіл на базі змішаного варіаційного функціоналу представлена детально в роботах [2-4]. Змішаний варіаційний функціонал у циліндричній системі координат для ізотропних осесиметрично навантажених тіл обертання в умовах повзучості запишеться у вигляді, як і в роботах [2-4]

$$R_{u\sigma} = \iint_{\Omega} \left\{ \sigma_{rr} \frac{\partial u_r}{\partial r} + \sigma_{\theta\theta} \frac{u_r}{r} + \sigma_{zz} \frac{\partial u_z}{\partial z} + \sigma_{rz} \left(\frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) - \frac{1}{2E} \sigma_{rr}^2 - \frac{1}{2E} \sigma_{\theta\theta}^2 - \frac{1}{2E} \sigma_{zz}^2 - \frac{\nu}{G} \sigma_{rr} \sigma_{\theta\theta} + \frac{\nu}{E} \sigma_{zz} \sigma_{\theta\theta} + \frac{\nu}{E} \sigma_{rr} \sigma_{zz} - f_r u_r - f_z u_z - \right. \\ \left. - C_{rr} \sigma_{rr} - C_{\theta\theta} \sigma_{\theta\theta} - C_{zz} \sigma_{zz} - 2C_{rz} \sigma_{rz} \right\} d\Omega - \iint_{S_i} t^i u_i dS - \iint_{S_u} n_i \sigma^{ij} (u_i - u_i^*) dS \quad (1)$$

Умова стаціонарності цього змішаного варіаційного функціоналу запишеться так:

$$\iint_{\Omega} \left\{ \delta \sigma_{rr} \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{1}{E} \sigma_{rr} + \frac{\nu}{E} \sigma_{\theta\theta} + \frac{\nu}{E} \sigma_{zz} - C_{rr} \right) + \delta \sigma_{zz} \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} - \frac{1}{E} \sigma_{zz} + \frac{\nu}{E} \sigma_{rr} + \frac{\nu}{E} \sigma_{\theta\theta} - C_{zz} \right) + \delta \sigma_{rz} \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} - \frac{1}{G} \sigma_{rz} - 2C_{rz} \right) - \right. \\ \left. + \delta \sigma_{\theta\theta} \left(\frac{u_r}{r} - \frac{1}{E} \sigma_{\theta\theta} + \frac{\nu}{E} \sigma_{rr} + \frac{\nu}{E} \sigma_{zz} - C_{\theta\theta} \right) + \delta u_r \left(\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}}{r} - \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} + f_r \right) - \delta u_z \left(\frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{zz}}{r} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} + f_z \right) \right\} d\Omega = 0 \quad (2)$$

де Ω - двовимірна область, обмежена позаддовжнім перерізом тіла; E, ν, G - модуль пружності, коефіцієнт Пуассона і модуль зсуву; $C_{rr}, C_{\theta\theta}, C_{zz}, C_{rz}$ - компоненти тензора деформацій повзучості.

В роботі запропоновано чисельно-аналітичний метод розв'язування початково-крайових задач повзучості, що засновано на сполученні методу продовження рішення за часом з рішенням варіаційної рівності (2) на кроці часу. Для визначення деформацій повзучості та пошкоджуваності на кроці часу застосоване чисельне інтегрування рівнянь методом Рунге-Кутта-Мерсона з автоматизованим вибором кроку у часі [2,3], а для пошуку стаціонарних точок змішаного функціоналу (1) - варіаційно-структурний метод теорії R- функцій [3].

В роботі узагальнено для повзучості відомі в теорії пружності [6] апостеріорні оцінки точності рішень варіаційної рівності (2), за яким одержані інтегральні оцінки наближених розв'язків задач повзучості у вигляді

$$\left\{ \forall u_i, \sigma^{ij} : L_u = R_{u\sigma} - \frac{1}{2} \iiint_V c^{ijkl} C_{ij} C_{kl} dV = K_{\sigma} - \frac{1}{2} \iiint_V c^{ijkl} C_{ij} C_{kl} dV \right\} \quad (3)$$

Значення порівнюваних величин обчислюються на одержаних у кожен момент часу рішеннях по формулах:

$$L_u = \iiint_V \left[\frac{1}{2} c^{ijkl} \varepsilon_{ij}(\vec{u}) \varepsilon_{kl}(\vec{u}) - c^{ijkl} C_{ij} \varepsilon_{kl}(\vec{u}) - u_i f^i \right] dV - \iint_{S_i} u_i t^i dS$$

$$K_{\sigma} = \iint_{S_u} \sigma^{ij} n_j u_i^* dS - \iiint_V \left[\frac{1}{2} d_{ijkl} \sigma^{ij} \sigma^{kl} + \sigma^{ij} C_{ij} \right] dV$$

Абсолютні значення зазначених тут величин збігаються на точно знайдених рішеннях варіаційної рівності, і по нормі їх відмінності дозволяють оцінити наближені рішення.

В роботі для широкого класу двовимірних крайових задач запропоновано структуру рішення:

$$u_i = u_i(\omega, \Phi), \quad \Phi_i = \sum_{k,l} a_{kl}^{(i)} \varphi_{kl}^{(i)}$$

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(\omega, P), \quad P_{ij} = \sum_{k,l} b_{kl}^{(ij)} \psi_{kl}^{(ij)}$$

які дозволили у загальному випадку записати розв'язки крайових задач повзучості в аналітичному вигляді:

$$u_i = u_{i*} + \sum_{r=1}^n a_i^{(r)} \varphi_i^{(r)}$$

$$\sigma^{ij} = \sigma_*^{ij} + \sum_{r=1}^n b_{(r)}^{ij} \psi_{(r)}^{ij} \tag{4}$$

де $\omega\{\omega\}$ – R-функції, завдяки яким точно задовольняються крайові умови, $\Phi\{\Phi_i\}$, $P\{P_{ij}\}$ – вільні компоненти структур, u_{i*} , σ_*^{ij} – задані компоненти вектора переміщень і тензора напружень, $a_i^{(r)}$, $b_{(r)}^{ij}$ – коефіцієнти вільних компонентів структур, що підлягають визначенню, $\varphi_i^{(r)}$, $\psi_{(r)}^{ij}$ – координатні функції, що мають володіти властивістю повноти.

Систему лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) відносно коефіцієнтів вільних компонентів структур одержано в матрично-блоковому вигляді

$$\begin{bmatrix} [R_{11}] & [R_{12}] \\ [R_{21}] & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_{\sigma} \\ q_u \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} P_{\sigma} + P_c \\ P_u \end{Bmatrix}, \tag{5}$$

де $q_u\{a_i^{(r)}\}$, $q_{\sigma}\{b_{(r)}^{ij}\}$ – вектори, що складено з коефіцієнтів вільних компонентів структур, $[R_{ij}]$ – блокові матриці, p_{σ} , p_u , p_c – вектори, що відповідають заданим значенням шуканих функцій на границях тіла і деформаціям повзучості в розглянутий момент часу.

Елементи блокових матриць і векторів правих частин:

$$R_{11}^{(11)} = - \iiint_V \frac{1}{E_r} \psi_{(1)} \psi_{(1)} dV$$

$$R_{21}^{(24)} = - \iiint_V \varphi_{(2)} \left(\frac{\partial}{\partial r} (\psi_{(4)}) + \frac{\psi_{(4)}}{r} \right) dV$$

$$p_1^{(\sigma)} = \iiint_V \psi_{(1)} \left(\frac{\partial}{\partial r} u_r^* - \frac{1}{E_r} \sigma_{rr}^* + \frac{v_{\theta r}}{E_r} \sigma_{\theta\theta}^* + \frac{v_{zr}}{E_z} \sigma_{zz}^* \right) dV$$

$$p_4^{(c)} = - \iiint_V \psi_{(4)} C_{rz} dV$$

знаходяться шляхом чисельного інтегрування по формулах квадратур Гауса або Сімпсона. Коефіцієнти вільних компонентів структур (4) визначаються рішенням СЛАР (5) методом Гауса.

Результати дослідження. Ущільнювальні кільця у вигляді плоскої прокладки застосовують у затворах, призначених для зборки і розбирання з'єднань. Внутрішній діаметр таких кілець $D=200\dots1000$ мм, тиск середовища на кільця має значення $p=10\dots30$ МПа [5]. Для виготовлення плоских прокладок рекомендують використовувати алюмінієві сплави, мідь і сталь [5].

Розглянемо плоску прокладку, представлена на рис.1 і призначену для герметизації посудини із внутрішнім діаметром $D=200$ мм, що працює під внутрішнім тиском $p=20$ МПа. Геометричні параметри прокладки приймемо наступними: $h=2$ мм, $D_1=205$ мм, $D_2=245$ мм.

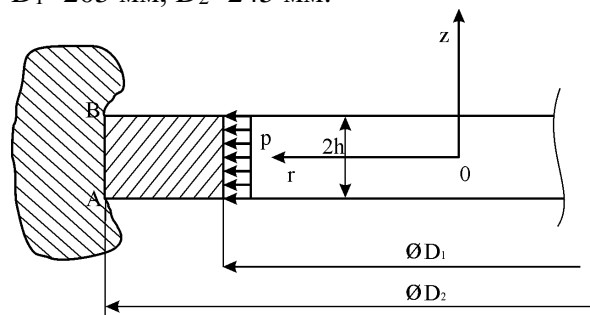


Рис. 1. Схема ущільнювального з'єднання із плоскою прокладкою

В розрахунках на повзучість і пошкоджуваність приймемо матеріал плоскої прокладки – мідь при температурі 400^0 С. Для такого матеріалу значення констант, що входять у рівняння стану повзучості [3,4], і значення механічних характеристик прийняті наступними: $E=0,9 \cdot 10^5$ МПа, $V=2,538 \cdot 10^{-8}$ МПа⁻ⁿ/год, $D=1,573 \cdot 10^{-10}$

$M\text{Па}^{-k}/\text{год}$, $n=3,39$, $k=5,52$, $l=m=0,935$, $r=1$, $\alpha=0$, $\nu=0,3$.

Крива повзучості для міді з урахуванням даних констант була отримана при інтегруванні рівнянь стану повзучості й зображена на рис.2.

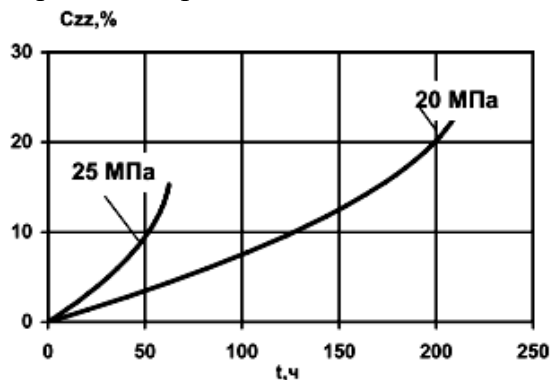


Рис. 2. Криві повзучості для міді при 400°C

Розглянемо випадки взаємодії плоскої прокладки на зовнішньому радіусі $R_2=D_2/2$ зі стінками затвора за рахунок діючого тиску середовища P при повному або частковому зчепленні точок контактуючих поверхонь.

Розглянемо повзучість плоскої прокладки при повному зчепленні її точок на зовнішньому радіусі зі стінками затвора високого тиску. Для оцінки збіжності рішення в початковий момент часу $t=0$, використовувалися інтегральні оцінки функціоналів Рейснера, Кастільяно й Лагранжа. Встановлено, що при втриманні восьми базисних функцій у структурах рішень напружень і переміщень ($N^2=64$) значення функціоналів практично збігаються й рівні:

$$\frac{I_R}{2\pi} \approx \frac{I_L}{2\pi} \approx \frac{I_C}{2\pi} \approx -0.01578 \text{ Дж. Часово-просторова дискретизація в розрахунках повзучості плоскої прокладки визначена наступною: параметри дискретизації просторової області при інтегруванні коефіцієнтів СЛАР прийняті рівними } k_r=k_z=61, \text{ eps}=10^{-5}, \Delta t_0=2 \cdot 10^{-2} \text{ години.}$$

Закономірності повзучості представлені у вигляді змін полів напружень і переміщень до закінчення прихованого руйнування. На рис. 3 і рис. 4 представлені розподіли радіальних й окружних напружень в початковий момент часу, $t_0=0 \text{ год}$, та в момент прихованого руйнування $t_2=132,6$

год , $\omega^*=0,9$. Слід відзначити значний перерозподіл контактних (радіальних) напружень. На краях ($r=R_2$, $z=\pm h$) відбувається падіння рівня радіальних напружень з 26 МПа до 22 МПа . У зоні контакту відбувається значний перерозподіл окружних напружень, відбувається збільшення за абсолютним значенням рівня напружень вздовж усього перерізу ущільнення.

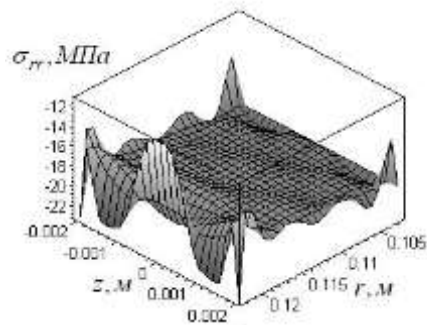
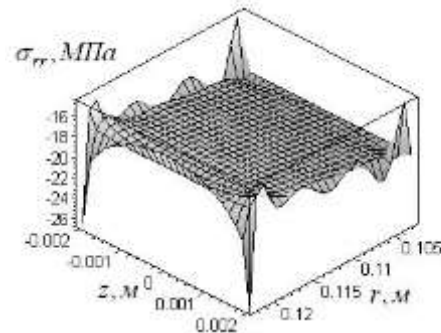


Рис. 3. Розподіл радіальних напружень

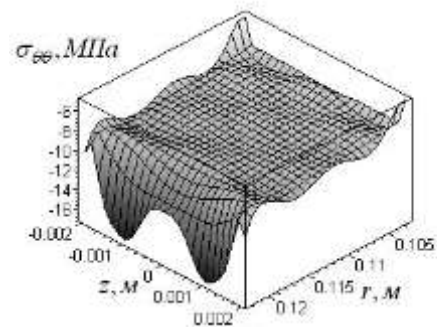
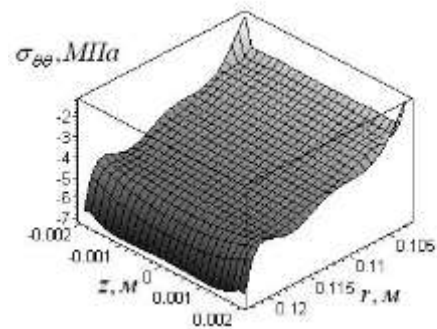


Рис. 4. Розподіл окружних напружень

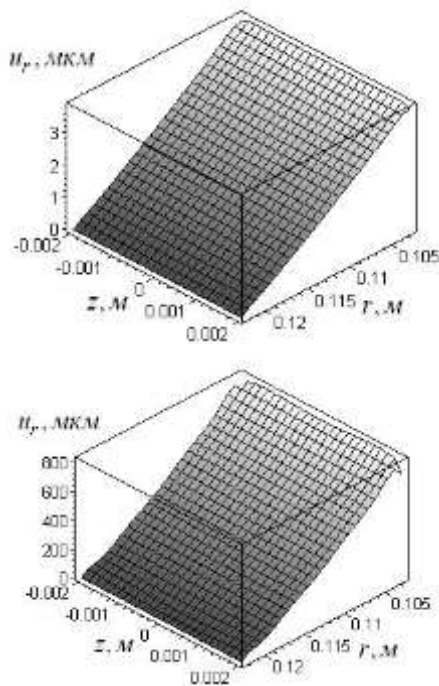


Рис. 5. Розподіл радіальних переміщень

На рис. 5 представлені розподіли радіальних переміщень. Переміщення ростуть по величині із часом й в момент руйнування перевищують початкові значення (рис. 5) практично в 200 разів. Змін осьових і дотичних напружень із часом практично не відбувається. Рівень абсолютних значень осьових напружень не перевищує 12 МПа, а дотичних – 8 МПа. Слід зазначити значний ріст осьових переміщень внаслідок повзучості. У момент руйнування їх значення досягають порядку 100 мкм.

Далі розглянемо випадок взаємодії плоскої прокладки із гладкими стінками затвора на зовнішньому радіусі. Геометричні, фізичні, механічні параметри, матеріал прокладки й рівень тиску середовища на плоску прокладку залишимо незмінними, як і для випадку повного зчеплення. Аналогічно попередньому випадку для оцінки збіжності рішення в початковий момент часу використовувалися інтегральні оцінки функціоналів. При втриманні 7-ми базисних функцій у структурах рішень напружень і переміщень ($N^2=49$) значення функціоналів практично збігаються й рівні:

$$\frac{I_R}{2\pi} \approx \frac{I_L}{2\pi} \approx \frac{I_C}{2\pi} \approx -0.015827 \text{ Дж.}$$

Часово-просторова дискретизація в розрахунках повзучості плоскої прокладки

прийнята наступною: $k_r=k_z=61$, $\epsilon_{ps}=10^{-4}$, $\Delta t_0=2 \cdot 10^{-1}$ год. Розподіли радіальних й окружних напружень представлені на рис. 6 і рис. 7 в початковий момент часу $t_0=0$ год, та в момент часу $t_2=444$ ч, $\omega^*=0,9$. Слід зазначити незначне підвищення рівня радіальних напружень на зовнішньому радіусі в зоні контакту. Окружні напруження ростуть із часом. Аналогічно на рис. 8 наведені розподіли радіальних переміщень, які істотно ростуть внаслідок повзучості.

Осьові й дотичні напруження практично відсутні та з часом не змінюються. Значно ростуть осьові переміщення і їх максимальні значення в момент руйнування становлять 400 мкм. Встановлено, що точка початку прихованого руйнування знаходиться на внутрішньому радіусі, на краю ущільнення.

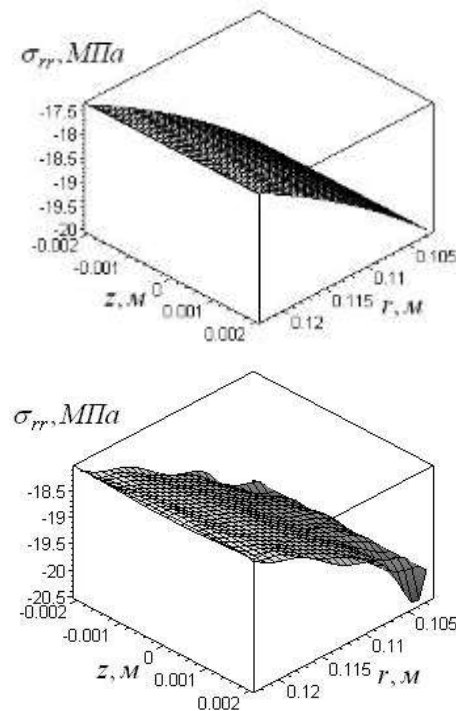


Рис. 6. Розподіл радіальних напружень

Слід відзначити, що в ущільнювальних з'єднаннях має місце релаксація контактних напружень і руйнування внаслідок повзучості, що впливає на герметичність з'єднань. Також впливає на довготривалу міцність і зміну напружено-деформованого стану внаслідок повзучості характер взаємодії точок контакту ущільнювального кільця й затвора. Розрахункові дані дозволяють встановити, що повне зчеплення точок контактуючих поверхонь є

найнебезпечнішим, тому що значно скорочує час до руйнування ущільнювального кільця (практично в 4 рази).

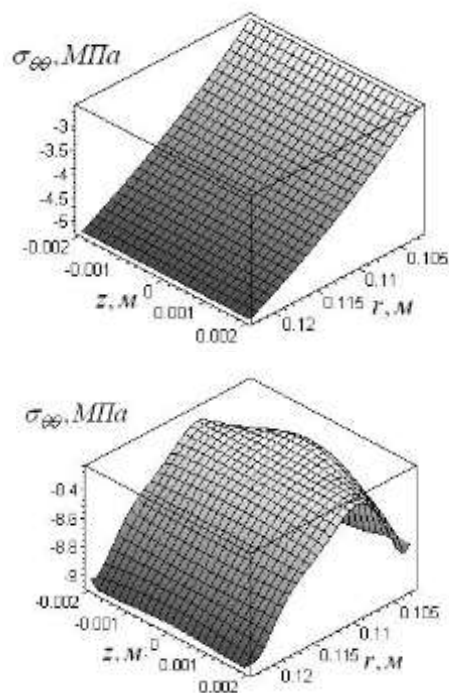


Рис. 7. Розподіл окружних напружень

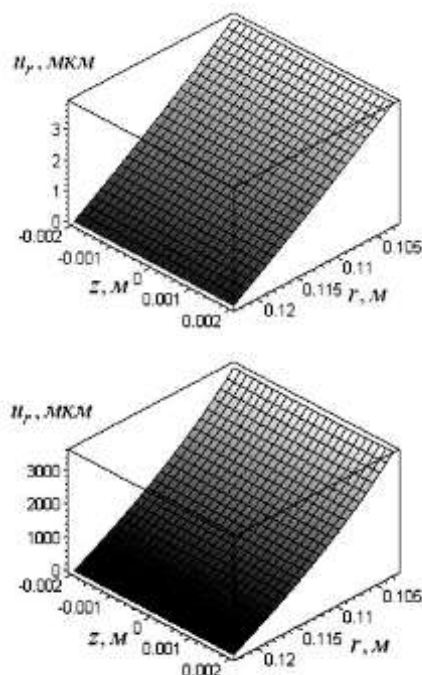


Рис. 8. Розподіл радіальних переміщень

Висновки. У статті розглянуто повзучість ущільнювальних з'єднань із прокладками у вигляді ущільнювальних кільць прямокутного перерізу з міді, що найбільше використовуються у техніці. Вивчено питання повзучості і релаксації кон-

тактних напружень ущільнювальних кільць прямокутного перерізу в умовах взаємодії зі стінками затвору при повному і частковому зчепленні точок контактуючих поверхонь. Закономірності повзучості представлено у вигляді змін полів напружень і переміщень за часом аж до закінчення прихованого руйнування.

Аналіз одержаних результатів дозволив зробити висновок про істотний перерозподіл полів нормальних і дотичних напружень, ослаблення з'єднань за рахунок зниження рівня контактних напружень за часом, особливо на краях кільця, що сприяє розгерметизації затвору. Повзучість сприяє значному росту переміщень у крайніх точках внутрішньої поверхні кільця.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Altenbach H., Morachkovsky O., Naumenko K., Sychov A. Geometrically nonlinear bending of thin - walled shells and plates under creep - damage conditions. Arch. Appl. Mech., 67, (1997), p. 339 - 352.
2. Morachkovsky O., Sobol V., Zamula A. The methods for solution of static and dynamic creep problems for bodies of revolution // Тезиси докладов Международной конференции «Nonlinear Dynamics». – Харків, 2004. – С. 59.
3. Соболь В.Н. Численные решения задач динамической ползучести тел на базе смешанного вариационного функционала. / В.Н. Соболь // МАРКОВА АД, 2014. – С. 3-6.
4. Romashov Yu.V., Sobol V.N. Mathematical formulations and numerical solutions of initial-boundary-value problem of creep theory // Contemporary problems of mathematics, mechanics and computing sciences / N.N. Kizilova, G.N. Zholtkevych (eds.). – Kharkov: Publishing house PPB Virovec' A.P. Publishing house is a group «Apostrophe», 2011. – 396 p. – P. 120-129.
5. Сосуды и трубопроводы высокого давления: Справочник / Хисматуллин Е.Р., Королев Е.М., Лившиц В.И. и др. - М.: Машиностроение, 1990. - 384 с.
6. Сало В. А. Краевые задачи статики оболочек с отверстиями: Монография. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. – 216 с.
7. Малинин Н.Н. Расчеты на ползучесть элементов машиностроительных конструкций. - М.: Машиностроение, 1981. - 221с.