

УДК 620.178.15/179.119

Ф. Гігіняк, докт. техн. наук; П. Булах

Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України

ОЦІНЮВАННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ СТАЛІ 10ГН2МФА З УРАХУВАННЯМ ПОШКОДЖУВАНOSTІ МЕТАЛУ В УМОВАХ СКЛАДНОГО НАПРУЖЕНОГО СТАНУ

Резюме. На основі аналізу результатів проведених експериментальних досліджень запропоновано розрахунково-експериментальний метод оцінювання довговічності матеріалів при циклічному навантаженні в умовах складного напруженого стану з урахуванням пошкоджуваності металу.

Ключові слова: циклічне навантаження, складний напружений стан, пружнов'язкопластична модель, пошкоджуваність, коефіцієнт гомогенності, швидкість повзучості, довговічність.

F. Giginyak, P. Bulakh

THE SERVICE LIFE CALCULATING OF 10GN2MFA STEEL WITH CONSIDERATION OF THE METAL DAMAGE UNDER COMPLEX STRESS STATE

The summary. Based on the results of experimental studies on damageability of steel 10GN2MFA under cyclic loading at a complex stress state, a version of the method for calculating the service life of heat-resistant steels has been proposed.

Key words: cyclic loading, complex stress state, elastic-viscoplastic model, metal damage, coefficient of homogeneity, creep rate, calculating the service life.

Вступ. Дослідження механічних властивостей конструкційних матеріалів з урахуванням часових факторів та кінетики пошкоджуваності при непружному деформуванні дають змогу, з одного боку, визначити умови навантаження, при яких фактор часу можна не враховувати, а з іншого – вивчити й описати аналітично виявлені ефекти та розвинути на їх основі нові або удосконалити існуючі методи розрахунку реальних конструкційних елементів в умовах статичного і циклічного навантаження. При цьому потрібно враховувати, що пошкоджуваність металу при циклічному навантаженні розвивається, починаючи з мікроструктурного рівня і, в міру навантаження, в цей процес додаються також й інші (мезо- та макрорівні).

Методика експерименту й аналіз отриманих експериментальних даних. Дослідження розвитку процесу деформування та кінетики накопичення пошкоджень проводили при кімнатній температурі в умовах циклічного ступеневого і безперервного циклічного навантаження за умов складного напруженого стану за методикою, викладеною в роботах [1, 2].

Дослідження проводили на тонкостінних трубчастих зразках ($D_3/\delta = 50$, де D_3 – зовнішній діаметр зразка; δ – товщина стінки зразка) в умовах м'якого навантаження, під дією осьової сили та внутрішнього тиску в різних їх співвідношеннях із використанням випробувального стенда СНТ-8У. Були реалізовані одновісний ($K = \sigma_z/\sigma_\theta = \infty$) та двовісний циклічний розтяг ($K = 0,5; 2; 1$). Частота циклічного навантаження становила 2 цикл./хв. по трапецієподібному циклу з витримкою під максимальним навантаженням 4с.

При ступеневому циклічному навантаженні на кожному ступені навантаження продовжувалося до моменту, коли наставав рівноважний стан, з переходом після

розвантаження на наступний ступінь циклічного навантаження із вищим рівнем максимальної інтенсивності циклу.

Після кожного ступеня циклічного навантаження твердість сталі вимірювали по кільцю на спеціально підготовленій поверхні робочої частини (бази зразка $l=20$ мм), на якій у процесі навантаження проводився замір поздовжньої та поперечної деформацій. Виміри твердості проводили портативним твердоміром ERNST (Швейцарія), оснащеним автоматичною системою обробки отриманих даних, що дозволяє виключити суб'єктивні похибки. При безперервному циклічному навантаженні вимірювання твердості проводили після заданої кількості циклів навантаження.

У даній роботі в якості характеристик міцності й деформації досліджуваної сталі 10ГН2МФА використовували інтенсивність напружень σ_i та інтенсивність деформацій ϵ_i . При аналізі отриманих результатів, що характеризують пошкоджуваність металу, використовували відносні значення коефіцієнта гомогенності за методом LM-твердості [1] $m_{відн} = m_i / m_{поч}$, де m_i – поточне значення коефіцієнта гомогенності, розраховане за методикою [2] на основі вимірів твердості металу зразка після циклічного навантаження до заданої кількості циклів при заданому рівні максимального навантаження циклу; $m_{поч}$ – значення коефіцієнта гомогенності, отримані на основі вимірів твердості металу зразка в його початковому стані.

В наших дослідженнях використані основні підходи, покладені в основу розробленої раніше в ІПМіц ім. Г.С. Писаренка НАН України пружнов'язкопластичної моделі (рис. 1) [3].

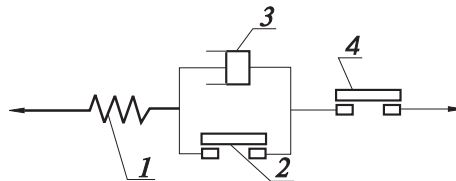


Рисунок 1. Модель ПВП – властивостей матеріалу і характеристики її елементів:
1 – пружності; 2, 4 – пластичності; 3 – в'язкості

З експериментально отриманого зв'язку [2] між швидкістю повзучості та характеристикою розсіяння результатів вимірів твердості досліджуваного металу (коефіцієнта гомогенності $m_{відн}$) можна зробити висновок щодо необхідності оцінювання взаємозв'язку між вказаним вище коефіцієнтом $m_{відн}$ та основними параметрами ПВП моделі $(\sigma_i^*, k_i', \epsilon_i)$, що враховують в'язкі властивості металу, що проявляються рельєфно в умовах циклічної повзучості. При цьому вказані вище параметри σ_i^* – інтенсивність нерівноважних напружень і k_i' – коефіцієнт циклічної в'язкості металу, параметр інваріантний до виду напруженого стану визначаються за методикою, викладеною в [3].

Якщо проаналізувати криві повзучості досліджуваної сталі при різних видах напруженого стану на стадіях сповільненої та сталої повзучості разом з отриманими на цих ділянках кривих даними про пошкоджуваність металу, можна відзначити, що динаміка процесу пошкоджуваності як і накопичена деформація слабо залежить від виду напруженого стану на вказаних вище стадіях процесу повзучості.

Як бачимо з представлених на рис. 2 результатів, інтенсивність швидкостей циклічної повзучості в умовах двовісного розтягу нижче, ніж при одновісному пульсуючому розтязі, що завершується квазістатичним руйнуванням при реалізованих співвідношеннях головних напружень для однакових рівнів максимальних напружень циклу.

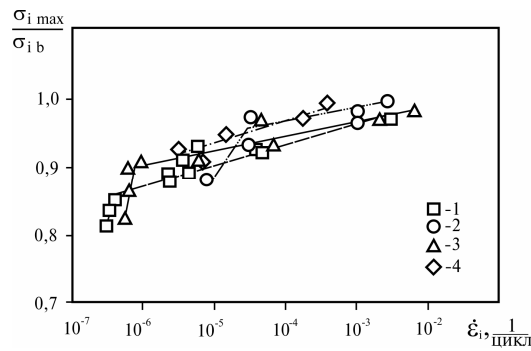


Рисунок 2. Граничні криві інтенсивності швидкостей сталі 10ГН2МФА при $T=20^{\circ}\text{C}$ і різних співвідношеннях головних напружень:
 1 – $K=\sigma_z/\sigma_{\theta}=\infty$; 2 – $K=0,5$; 3 – $K=2$; 4 – $K=1$

Разом з тим, експериментальні дані, представлені на даному рисунку, свідчать про те, що в умовах двовісного циклічного розтягу властивість сталі опиратися втомному руйнуванню нижче, ніж при одновісному розтязі.

Результати аналізу кінетики пошкоджуваності представлені на рис. 3 [4] свідчать, що темп зниження відносних величин коефіцієнта гомогенності m в умовах двовісного, особливо нерівномірного двовісного, розтягу, більш низький, ніж при одновісному розтязі, що, можливо, пов'язано з меншою величиною граничної деформації, яка відповідає втраті стійкості пластичного деформування в умовах $K=0,5$ і 2 в порівнянні з граничною деформацією при $K=1$ і ∞ .

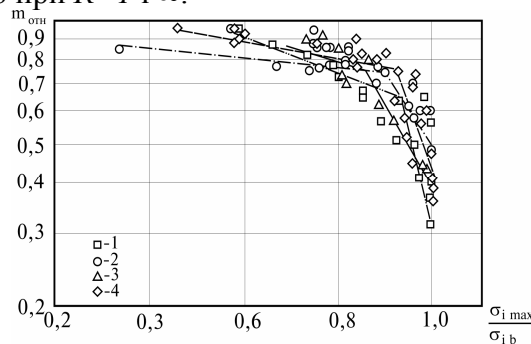


Рисунок 3. Залежність величини відносного коефіцієнта гомогенності сталі 10ГН2МФА від рівня максимальної інтенсивності напружень циклу в умовах циклічного навантаження при різних видах напруженого стану. Позначення ті самі, що і на рис. 2

Як бачимо з рис. 3, досягнення металом граничного стану (втрата стійкості пластичного деформування) супроводжується достатньо інтенсивною зміною величини коефіцієнта гомогенності для всіх досліджуваних видів напруженого стану, що відображає кінетику пошкоджуваності металу. При цьому граничне значення $m_{відн}$, що відповідає початку процесу втрати стійкості пластичного деформування, залежить від виду напруженого стану. Для випадків циклічного двовісного розтягу ($K=\sigma_z/\sigma_{\theta}=2$; 1 ; $0,5$) $m_{омн}=0,75$, а для одновісного циклічного розтягу $m_{омн}=0,63$.

Результати наших досліджень показали, що при збільшенні швидкості циклічної повзучості пошкоджуваність металу зростає, а зменшення швидкості повзучості призводить до сповільнення процесу пошкоджуваності металу (рис. 4) [2, 4].

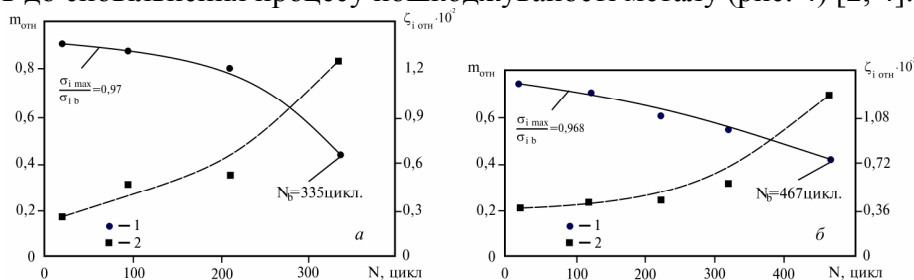


Рисунок 4. Залежності відносних 1 – коефіцієнта гомогенності $m_{\text{відн}}$ та 2 – інтенсивності швидкостей сталі циклічної повзучості $\dot{\xi}_i$ від напрацювання в умовах складного напруженого стану ($K=2$) за умов ступеневого циклічного навантаження сталі 10ГН2МФА з частотою 2 цикл./хв та різних довговічностях

На рис. 4 для оцінювання швидкості повзучості використовували відносні значення мінімальної інтенсивності швидкостей циклічної повзучості $\dot{\xi}_i = \dot{\epsilon}_{i\text{creep}} / \dot{\epsilon}_i$ [2, 4], де $\dot{\epsilon}_{i\text{creep}}$ – мінімальна інтенсивність швидкостей циклічної повзучості блоку циклічного навантаження, що розглядається, після якого оцінювали пошкодження металу; $\dot{\epsilon}_i$ – інтенсивність швидкостей деформацій, накопичених під час напрацювання всього блоку циклічного навантаження, що розглядається, після якого визначали коефіцієнт гомогенності.

Якщо проаналізувати зв'язок між коефіцієнтом гомогенності й швидкістю циклічної повзучості на стадії сталі повзучості при різних видах напруженого стану (рис. 6), можна зробити висновок, що зв'язок між вказаними характеристиками повзучості задовільно описується степеневою функцією виду:

$$\dot{\epsilon}_i = c m_{\text{відн}}^{-d} \tag{1}$$

де c і d – коефіцієнти, які визначаються із залежності $\dot{\epsilon}_i - m_{\text{відн}}$ (рис. 5). Для досліджуваного матеріалу $c = 1,9 \times 10^{-5}$, $d = 4,2$.

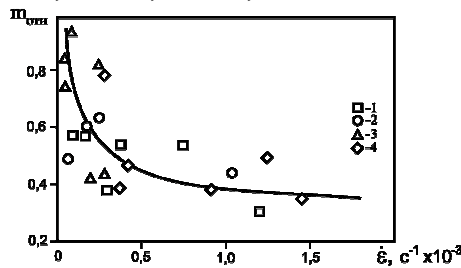


Рисунок 5. Залежність відносного коефіцієнта гомогенності від інтенсивності швидкостей циклічної повзучості на стадії сталі повзучості при різних співвідношеннях головних напружень. Позначення ті самі, що і на рис. 2

Відповідно до ПВП-моделі розвиток процесів повзучості визначається інтенсивністю нерівноважних напружень σ_i^* . При цьому приймається, як і для інших теплостійких сталей, лінійна залежність між швидкістю повзучості та нерівноважним напруженням [3] у вигляді

$$\dot{\epsilon}_{i\text{повз}} = k_i \sigma_i^* \tag{2}$$

Як відомо [5], коефіцієнт в'язкості є параметром, інваріантним до виду напруженого стану і величини накопиченої незворотної деформації, а залежить тільки від величини нерівноважних напружень [3]

$$k_i = a(\sigma_i^*)^b, \tag{3}$$

де a і b – характеристики матеріалу, що визначаються з експериментів на циклічне ступеневе навантаження або за результатами двох базових дослідів при одновісному пульсуючому навантаженні. Для сталі 10ГН2МФА $a = 9,3 \cdot 10^{-7}$, $b = 3,11$.

Аналіз представлених на рис. 6 залежностей $m_{\text{відн}} - \sigma_i^*$, отриманих в умовах досягнення рівноважного напруженого стану металу на різних ступенях навантаження для різних співвідношень головних напружень, що дає можливість з деякою достовірністю стверджувати, що коефіцієнт гомогенності $m_{\text{відн}}$ є параметром, інваріантним до виду напруженого стану.

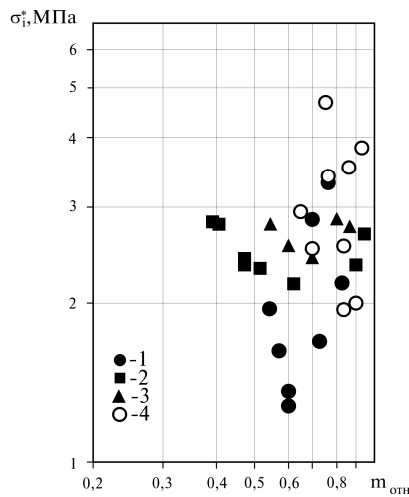


Рисунок 6. Залежність відносного коефіцієнта гомогенності від інтенсивності нерівноважних напружень σ_i^* при різних співвідношеннях головних напружень:
 1 – $K=\sigma_z/\sigma_\theta=\infty$; 2 – $K=0,5$; 3 – $K=2$; 4 – $K=1$

На основі даних, представлених на рис. 6, модифіковане нерівноважне напруження можна представити через коефіцієнт гомогенності $m_{відн.}$ у вигляді

$$\sigma_{i\text{ мод}}^* = 0,95m^{-2,4}. \quad (4)$$

Таким чином, можливо суттєво зменшити кількість експериментів, необхідних для визначення $\sigma_{i\text{ мод}}^*$, і зменшити об'єм програми обробки результатів експериментальних досліджень, використовуючи тільки дані про кінетику накопичення пошкодження досліджуваної сталі при одновісному циклічному розтязі.

Як бачимо з представлених на рис. 7 даних, для обох залежностей ($k_i - \sigma_i^*$ (рис. 7а) і $k_i - \sigma_{i\text{ мод}}^*$ (рис. 7б)) характерною є інваріантність характеристик в'язких властивостей k_i досліджуваної сталі до виду напруженого стану.

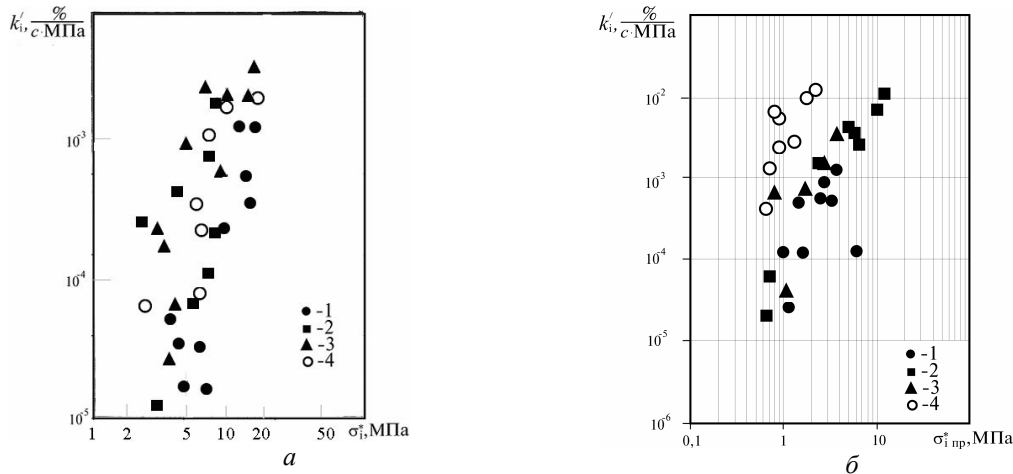


Рисунок 7. Залежність коефіцієнта циклічної в'язкості k_i від інтенсивності нерівноважних напружень σ_i^* (а) і модифікованих нерівноважних напружень $\sigma_{i\text{ мод}}^*$ (б) при різних співвідношеннях головних напружень. Позначення ті самі, що і на рис. 6

Проте значення коефіцієнтів a і b , що визначаються з експериментів при ступеневому циклічному навантаженні, дещо відрізняються від коефіцієнтів $a_{\text{мод}}$ і $b_{\text{мод}}$, що визначаються з урахуванням пошкоджуваності, тоді залежність (3) матиме вигляд

$$k_i = a_{\text{мод}} (\sigma_{i\text{ мод}}^*)^{b_{\text{мод}}}. \quad (5)$$

Проаналізувавши кінетику процесів пошкоджуваності в умовах повзучості й визначивши нерівноважні напруження σ_i^* , для заданого режиму навантаження можна аналітично описати повзучість. Якщо об'єднати це з умовою втрати стійкості процесу деформування з урахуванням впливу виду напруженого стану, як запропоновано для інших теплостійких сталей в [3], можна намітити шляхи для удосконалення критерію оцінки довговічності у вигляді

$$N_b \dot{\epsilon}_{i \min} = C'_i, \quad (6)$$

де N_b – кількість циклів навантаження, що відповідає втраті стійкості процесу деформування; $\dot{\epsilon}_{i \min}$ – мінімальна швидкість циклічної повзучості; C'_i – функція деформаційних властивостей матеріалу і виду напруженого стану, величина постійна при заданих температурі та співвідношенні головних напружень.

Переписавши рівняння (6) з використанням залежності (1), отримаємо залежність для оцінювання довговічності металу високонавантажених елементів конструкцій з урахуванням пошкоджуваності у вигляді

$$N_b = C'_i \cdot \frac{m_{\text{відн}}^d}{c}. \quad (7)$$

Все викладене вище справедливо для області стійкого пластичного деформування.

Представлене на рис. 8 порівняння розрахованих по (7) значень довговічності з експериментальними даними, отриманими при безперервному пульсуючому навантаженні з різними співвідношеннями головних нормальних напружень, свідчать про задовільну, в першому наближенні, відповідність розрахунку з експериментом.

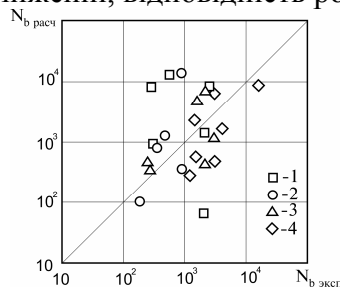


Рисунок 8. Порівняння експериментальних і розрахованих величин довговічності при різних співвідношеннях головних напружень. Позначення ті самі, що і на рис. 2.

Таким чином, співвідношення виду (7) може бути використано в інженерних розрахунках для попереднього експрес-оцінювання довговічності металу з урахуванням пошкоджуваності елементів конструкцій, що знаходяться під дією циклічного навантаження в умовах складного напруженого стану.

Докладніший розрахунок довговічності досліджуваної сталі з урахуванням пошкоджуваності можна отримати шляхом модернізації деяких параметрів співвідношення, за структурою подібного до представленого в [3], у процесі циклічного навантаження у вигляді

$$N_b = \frac{C'_i}{a \cdot (\sigma_{i \max} - \sigma_{i \Pi})^{b+1}}, \quad (8)$$

де $\sigma_{i \max}$ – максимальна інтенсивність напружень циклу; $\sigma_{i \Pi}$ – напруження переходу від втомного виду руйнування до квазістатичного.

Напруження переходу $\sigma_{i \Pi}$ є максимальним напруженням, при якому можливо досягти рівноважного напружено-деформованого стану в умовах циклічного навантаження, його можна визначити, поставивши два найлегше реалізованих експерименти – циклічний розтяг і пульсуючий внутрішній тиск [3].

Таким чином, для того, щоб описати процес повзучості з урахуванням динамічних ефектів і пошкоджуваності металу, що мають місце при циклічному навантаженні, необхідно побудувати квазістатичну (рівноважну) діаграму при одновісному ступеневому циклічному ростязі та встановити залежність коефіцієнта в'язкості сталі – параметра інваріантного до виду напруженого стану, що визначається за методикою, докладно викладеною в [3], від нерівноважних напружень.

У результаті, враховуючи залежності (4) і (5), отримаємо рівняння виду

$$N_b = \frac{C_i'}{a_{\text{мод}} \cdot (\sigma_{i \text{ max}} - \sigma_{i \text{ n}})^{b_{\text{мод}}+1}}, \quad (9)$$

де $a_{\text{мод}} = 0,00025, \frac{\%}{\text{цикл} \cdot \text{МПа}}$, $b_{\text{мод}} = 0,5$ – параметри матеріалу, визначені при заданій температурі із залежності (5).

Порівняння отриманих із (9) значень довговічності з даними експериментів, проведених у даному дослідженні при безперервному циклічному навантаженні, представлено на рис. 9, свідчить про задовільну їх відповідність.

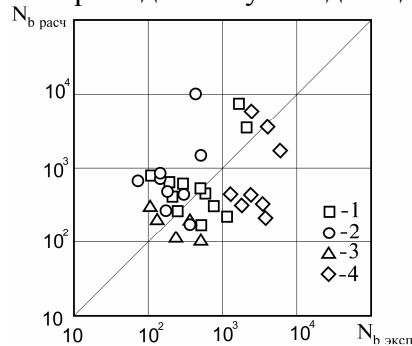


Рисунок 9. Порівняння експериментальних і розрахованих величин довговічності при різних співвідношеннях головних напружень. Позначення ті самі, що і на рис. 2

Висновки. Отримано великий масив експериментальних даних при різних видах напруженого стану про закономірності розвитку циклічної повзучості й зміни величини коефіцієнта гомогенності, що характеризує пошкоджуваність металу залежно від швидкості циклічної повзучості на різних стадіях цього процесу. Встановлено зв'язок між характеристиками в'язкості досліджуваного металу та його пошкоджуваністю. Показано, що досягнення металом граничного стану, що визначається втратою стійкості процесу деформування, залежить від виду напруженого стану і характеризується різними значеннями критичних величин коефіцієнта гомогенності $m_{\text{відн}}$.

Проведено модернізацію критерію оцінювання довговічності металу, що дозволяє розрахувати довговічність досліджуваної сталі з урахуванням пошкоджуваності металу при складному напруженому стані в умовах циклічного м'якого навантаження, що завершується квазістатичним руйнуванням на основі результатів обмеженого об'єму відносно простих базових експериментів. Результати наших досліджень є досить актуальними в даний час, у зв'язку з розвитком робіт з оцінювання продовження термінів експлуатації основного устаткування АЕС України.

Література

1. Патент №52107А Україна. Спосіб оцінки деградації матеріалу внаслідок накопичення пошкоджень в процесі напрацювання. "Метод LM- твердості" [Текст] / А.О. Лебедев., М.Р. Музыка., Н.Л., Волчек. – Опубл. 15.01.03, Бюл. №1.

2. Булах, П.А. Кинетика накопления поврежденных теплоустойчивых сталей при различных режимах нагружения [Текст] / Ф.Ф. Гигиняк, П.А. Булах, Т.Н. Можаровская // Проблемы прочности. – 2010. – №1. – С. 120–126.
3. Гігіняк, Ф.Ф. Міцність конструкційних матеріалів при малоцикловому навантаженні за умов складного напруженого стану [Текст] / Ф.Ф. Гігіняк, А.О. Лебедев, О.К. Шкодзінский. – К: Наукова думка, 2003. – 270 с.
4. Булах, П.О. Исследование развития процесса накопления поврежденных металла при циклическом нагружении в условиях сложного напряженного состояния [Текст] / П.О. Булах // Проблемы прочности. – 2011. – №.2 – С.122–127.
5. Вязкопластические свойства стали 10ГН2МФА при сложном напряженном состоянии [Текст] / Ф.Ф. Гигиняк, А.А. Лебедев, В.В. Башта, А.В. Гетманчук, В.Ф. Титов // Проблемы прочности. – 1994. – №4. – С. 30–35.

Отримано 10.08.2011