

defects in the case of steel wires hydrogenation. Cracks in the prestressing material could appear under cathodic charging due to facilitation of share processes in the surface layers by hydrogen. Steel susceptibility to hydrogen embrittlement should be taken into account using electrochemical protection of reinforced concrete structures.

Список використаної літератури

1. COST Action 521 – Corrosion of steel in reinforced concrete structures: Final report [Text] / R. Cigna, C. Andrade, U. Nurnberger et al (eds.). – Luxembourg: European Communities. – 2003. – 238 p.
2. In-service degradation of gas trunk pipeline X52 steel [Text] / G. Gabetta, H.M. Nykyforchyn, E. Lunarska et al. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2008. – 44, № 1. – С. 88 – 99.
3. Никифорчин, Г.М. Феномен прояву високотемпературної деградації зварного шва ошаднолегованої сталі [Текст] / Г.М. Никифорчин, О.З. Студент, А.Д. Марков // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2007. – 43, № 1. – С. 73 – 79.
(Nykyforchyn H.M., Student O.Z., and Markov A.D. Abnormal behavior of high-temperature degradation of the weld metal of low-alloy steel welded joints // Materials Science. – 2007. – № 1. – P. 77 – 84).
4. Опір крихкому руйнуванню металу сіткової гіперболоїдної вежі Шухова [Текст] / Г.В. Кречковська, О.З. Студент, А.І. Кутний та ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2014. – 50, № 4. – С. 87 – 93.
(Brittle-fracture resistance of the metal of hyperboloid gridshell Shukhov tower // Materials Science. – 2015. – № 4. – P. 578 – 584).
5. Stress corrosion cracking of the clad structural steel after its high temperature hydrogen degradation / K. Lublinska, O. Tsyurulnyk, M. Hredil et al. // Advances in materials science. – 2007. – V. 7.–№ 1. – P. 27 – 32.
6. Студент О.З. Вплив тривалої експлуатації сталі 12Х1МФ з різних зон гину парогону ТЕС на її механічні характеристики [Текст] / О.З. Студент, Л.М. Свірська, І.Р. Дзіоба // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2012. – 48, № 2. – С. 111 – 118.
(Student O.Z., Svirs'ka L.M., Dzioba I.R. Influence of the long-term operation of 12Kh1M1F steel from different zones of a bend of steam pipeline of a thermal power plant on its mechanical characteristics // Materials Science. – 2012. – 48, № 2. – P. 239 – 246.)
7. Toribio J., Ovejero E. Effect of cold drawing on microstructure and corrosion performance of high-strength steel // Mechanics of Time-Dependent Materials. – 1998. – № 1. – P. 307 – 319.
8. Toribio J., Ovejero E. Effect of cumulative cold drawing on the pearlite interlamellar spacing in eutectoid steel // Scripta Materialia. – 1998. – 39. – № 3. – Pp. 323 – 328.
9. Hredil M.I., Toribio J. Corrosion resistance of prestressing steel wires // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2014. – № 5. – С. 39 – 43.
10. J. Toribio, E. Ovejero. Failure analysis of cold drawn prestressing steel wires subjected to stress corrosion cracking // Engineering Failure Analysis. – 2005. – 12. – P. 654 – 661.
11. Quantitative fractographic analysis of the fracture behaviour of progressively drawn pearlitic steels / J. Ayaso, B. González, J.C. Matos // Proc. of the 10th Portuguese Conference On Fracture. – February 22 – 24, 2006. – Guimarães, Portugal. – 9 p.
12. E. Proverbio, P. Longo. Sub critical crack growth in hydrogen assisted cracking of cold drawn eutectoid steel // Corrosion Science. – 2007. – 49. – P. 2421 – 2435.

Отримано 28.09.2015

УДК 621.181:669.018

Леонтій Бабій, канд. техн. наук

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України

ТРИВАЛА МІЦНІСТЬ ЗВАРНИХ ШВІВ ТЕПЛОСТІЙКИХ СТАЛЕЙ У ГАЗОПОДІБНОМУ ВОДНІ

Резюме. Оцінено тривалу міцність різних зон зварного з'єднання за статичного та повторно-статичного навантаження сталі 15Х2МФА й характеристики повзучості після випроб на повітрі та в середовищі газоподібного водню металу різних зон зварних з'єднань жароміцних конструкційних сталей

15X2MФА і 2.25Cr-1Mo у вихідному стані й після деградації за лабораторних та експлуатаційних умов. Показано, що найслабшою зоною є зона термічного впливу, але найінтенсивніше деградує метал шва. Залишковий ресурс різних зон зварного з'єднання оцінили, використавши параметр Ларсона-Міллера.

Ключові слова: зварне з'єднання, залишковий ресурс, тривала міцність, швидкість повзучості.

LeontiyBabiy

LONG-TERM STRENGTH OF THE WELDS IN THE HEAT-RESISTANT STEELS IN HYDROGEN

Summary. The features of service regime of the oil hydrocracking reactors is associated with the high stress in its body due to fluctuations in temperature and pressure of the environment during the technological process. To understand the influence of such fluctuations of stress on the degradation characteristics of the weld joint of the steel 15Kh2MFA at static and re-static strength in gaseous hydrogen was investigated. It is established that metal of heat-affected zone is the weakest area of the weld joint at static and re-static loading under the basis of 250 hours of testing.

It was established the steady creep rate of 15Kh2MFA steel in hydrogen already in the initial state was worse than steel 2,25Cr-1Mo. At the same initial stress level ($\sigma_0 = 330$ MPa) the steady creep rate of the 15Kh2MFA steel was more than an order of magnitude higher than obtained for the 2,25Cr-1Mo steel ($7,4 \cdot 10^{-3}$ and $3 \cdot 10^{-4} \% / h$ respectively). The same tendency of change of the steady creep rate was saved in degraded steels at the same initial stress level ($\sigma_0 = 330$ MPa).

The long-term strength data for the metals of different zones of the weld joint on the 15Kh2MFA steel and for the base metal and weld metal on the 2.25Cr-1Mo steel were analyzed using the Larson-Miller parameter. The data obtained at higher loadings was extrapolated to its worker levels. Analysis of these results showed that the time to failure of the weld metal specimens of the 2.25Cr-1Mo steel degraded in operating conditions for $79 \cdot 10^3$ hours and tested at 290 MPa stress level and temperature of 450 °C, practically coincided with the such time of the base metal, degraded during $60 \cdot 10^3$ hours in service.

It was revealed that the long-term strength of the metal from all weld joint zones under re-static loading is lower than in a purely static one. The weld metal was the most sensitive to the effects of re-static loading. Using of the Larson-Miller parameter it was shown that long-term strength of the metal of different zones of the welded joint tested in hydrogen already in the initial state reached the lower limit of the regulated range for guarantee safe operation of the heat resistant steels.

Key words: weld joint, long-term strength, steady creep rate, high temperature hydrogen degradation.

Умовні позначення

ЗЗ – зварне з'єднання;

МШ – метал шва;

ОМ – основний метал;

ЗТВ – зона термічного впливу;

ТЦ – термоцикли;

ШУП – швидкість усталеної повзучості (на другій ділянці кривої повзучості);

ЛМР – параметр Ларсона-Міллера.

Вступ. Непрогнозовані руйнування великогабаритних конструкцій, таких, як корпуси реакторів гідрокрекінгу нафти, призводять до значних економічних втрат і тяжких екологічних наслідків. У зв'язку з цим оцінювання роботоздатності нафтопереробного устаткування в Україні вимагає детального вивчення деградації не тільки основного металу (ОМ), але найбільш уразливих зон таких конструкцій – зварних з'єднань (ЗЗ). За сумісного тривалого впливу наводнювального середовища та жорстких температурно-силових умов експлуатації ЗЗ стають особливо вразливими до крихкого руйнування. Сприяє цьому макронеоднорідність їх структури, хімічного складу та механічних властивостей. Структурні мікродфекти ЗЗ стають енергетично вигідними пастками для водню, що потрапляє до металу і під час зварювальних робіт, і з робочого середовища. А високоградієнтні поля залишкових напружень у них

сприяють перерозподілу водню і роблять їх особливо чутливими до його впливу. Тому деградація металу шва (МШ) у наводнювальному середовищі може відбуватися інтенсивніше порівняно з ОМ або зоною термічного впливу (ЗТВ).

Матеріали та методичні аспекти роботи. Досліджували типову для пострадянського простору теплостійку конструкційну сталь 15X2МФА й сталь типу 2.25Cr-1Mo у вихідному та деградованому станах, що використовуються для виготовлення корпусів реакторів гідрокрекінгу нафти.

Деградацію різних зон З3 сталі 15X2МФА проводили в лабораторних умовах із використанням відомої методики термоцикування зразків у газоподібному водні під тиском 0,3 МПа від кімнатної до робочої для реакторів гідрокрекінгу нафти температури (450 °С) до 200 термоциклів [1]. Експлуатаційна деградація зразків-свідків зі сталі 2.25Cr-1Mo та її З3 відбувалася під впливом технологічного середовища в реакторі гідрокрекінгу нафти впродовж $6 \cdot 10^4$ та $79 \cdot 10^3$ год відповідно.

Результати досліджень. Для підтвердження правомірності використання методики термоцикування зразків у водні для моделювання деградації сталей в лабораторних умовах оцінили зміну короткочасної статичної тріщиностійкості металу, деградованого в лабораторних і експлуатаційних умовах. Виявили, що термоцикування сталі 15X2МФА у водні впливає на її значення J_{Ic} . Зміна рівня J_{Ic} від 85 кН/м у вихідному стані до 18 кН/м після 600 ТЦ у водні дозволяє рекомендувати цей спосіб деградації теплостійких сталей для широкого використання. Ці результати підтвердили дані, отримані раніше на теплостійкій сталі 12X1МФ парогонів ТЕС [2], та свідчать про доцільність використання параметра J_{Ic} , як чутливого до деградації, для оцінювання стану металу [3]. Отримані дані свідчать також про загрози, пов'язані з присутністю в металі водню. Адже навіть за інтегрально невисокої концентрації в металі, його локальна концентрація може виявитися достатньою для істотного погіршення роботоздатності експлуатованого металу.

Раніше було встановлено, що водень (порівняно з повітрям) інтенсифікує процес деградації. Зокрема, це проявляється у тому, що незалежно від прикладеного початкового рівня напружень σ_0 швидкість усталеної повзучості (ШУП) у водні вища, ніж на повітрі [4, 5]. Це може бути зумовлено тим, що за випроб у водні поверхня зразків практично не окиснюється, а на повітрі – вкрита щільною окисною плівкою, яка перешкоджає виходу дислокацій на поверхню, гальмуючи процес деформування. Рухливість дислокацій у присутності водню підвищується згідно з експериментальними даними [6] й теоретичними розрахунками [7]. На цій основі вважали, що водень, полегшуючи рух дислокацій, може інтенсифікувати деформацію повзучості.

З іншого боку, особливості режиму роботи реакторів гідрокрекінгу нафти передбачають виникнення значних напружень у корпусі внаслідок коливань температури й тиску робочого середовища під час технологічного процесу. Для з'ясування впливу таких коливань напруженого стану на деградацію властивостей випробували метал З3 сталі 15X2МФА на статичну та повторно-статичну міцність у газоподібному водні. Під час зварювальних робіт на відповідальних об'єктах, як правило, застосовують автоматичне зварювання з дотриманням вимог регламенту. Тому МШ у вихідному стані виявив найвищий показник тривалої міцності (рис. 1 а). Встановлено також, що за бази випроб 250 год ЗТВ є найслабшою ділянкою З3 як за статичного, так і за повторно-статичного навантаження.

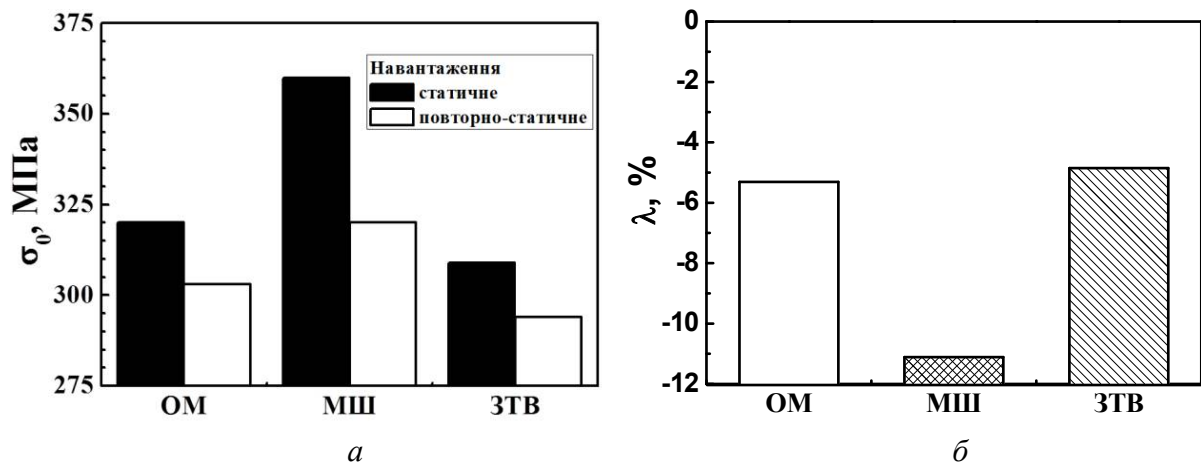


Рисунок 1. Порівняння тривалої міцності за статичного і повторно-статичного навантаження (а) та відносна зміна тривалої міцності, спричинена впливом повторно-статичного навантаження, (б) різних зон ЗЗ сталі 15Х2МФА у водні за температури 450 °С та бази випроб 250 год.

Figure 1. Comparison of long-term strength at static and re-static loading (a) and its relative change under the influence of re-static loading (b) of the metal from the different zones of weld joint on the 15Kh2MFA steel tested in hydrogen at the temperature of 450°C

Відомо, що у ЗЗ теплостійких сталей парогонів ТЕС під впливом робочого наводнювального середовища найсильнішим до деградації фізико-механічних властивостей є МШ [8]. Наші результати теж підтвердили (рис.1 б), що МШ деградує найсильніше. За повторно-статичного навантаження тривала міцність ОМ знижується на 5,3%, ЗТВ – на 4,9% а МШ – на 11,1%. Це може бути спричинено як впливом механічного чинника, так і активного наводнювального середовища.

Очевидно, що ШУП сталі й у вихідному стані, й після експлуатації однозначно знижується зі зниженням початкового рівня напружень σ_0 , причому і на повітрі, й у водні (рис. 2). Порівняння сталі 2,25Cr-1Mo після деградації в реакторі й неексплуатованої за ШУП при рівні $\sigma_0 = 330$ МПа свідчить, що у водні ШУП експлуатованого металу більш ніж у 110 разів перевищує її для сталі у вихідному стані.

За ШУП у водні сталь 15Х2МФА вже у вихідному стані виявилася гіршою ніж сталь 2,25Cr-1Mo. Якщо порівняти їх за однакового початкового рівня навантаження ($\sigma_0 = 330$ МПа), то ШУП сталі 15Х2МФА більше ніж на порядок вища, ніж сталі 2,25Cr-1Mo ($7,4 \cdot 10^{-3}$ і $3 \cdot 10^{-4}$ %/год відповідно).

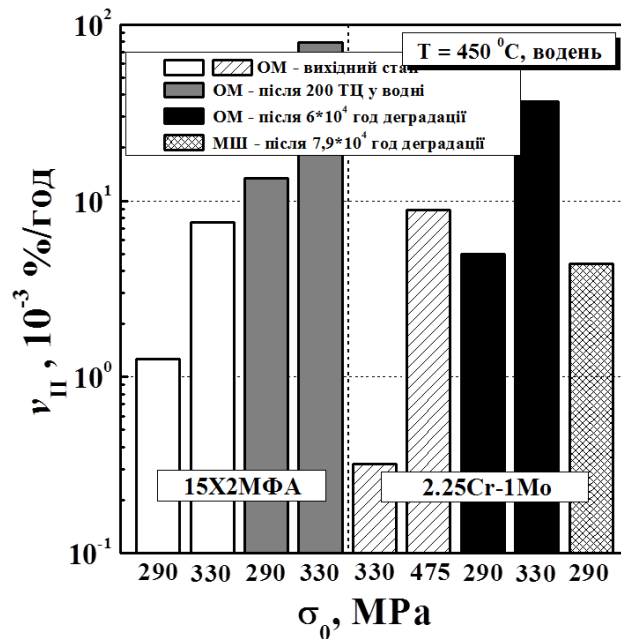


Рисунок 2. Порівняння сталей 15X2MФА і 2,25Cr-1Mo у вихідному стані та після деградації в лабораторних і експлуатаційних умовах за ШУП

Figure 2. Comparison of steady creep rate of the 15Kh2MFA and 2,25Cr-1Mo steels in the initial state and after degradation in laboratory and operation conditions

Така сама тенденція щодо швидкості ШУП за такого самого початкового рівня навантаження ($\sigma_0 = 330$ МПа) зберігається і після деградації сталей. ШУП сталі 15X2MФА залишається вищою, ніж сталі 2,25Cr-1Mo (відповідно $75 \cdot 10^{-3}$ і $38 \cdot 10^{-3}$ %/год). За нижчого рівня $\sigma_0 = 290$ МПа ця тенденція залишається незмінною. Це означає, що ще перед експлуатацією сталь 15X2MФА відзначається вищою схильністю до повзучості порівняно з вживаною в світовій практиці сталлю 2,25Cr-1Mo, а внаслідок деградації сталей різниця між ними за ШУП дещо зменшується.

Встановили, що значення ШУП для 33 сталі 2,25Cr-1Mo за випроб у водні при однаковому початковому рівні напружень ($\sigma_0 = 290$ МПа) практично на одному рівні для МШ після $79 \cdot 10^3$ год експлуатації в реакторі гідрокрекінгу нафти ($4,37 \cdot 10^{-3}$ %) і для OM після $60 \cdot 10^3$ год ($4,97 \cdot 10^{-3}$ %/год). Це може бути наслідком вищого опору повзучості МШ на початку експлуатації порівняно з OM.

Зменшення відмінностей за ШУП обох сталей після їх деградації може бути наслідком того, що сталь 15X2MФА дослідили на повзучість лише після 200 ТЦ у водні й вона, за такої кількості термоциклів, ще не досягла критичного рівня деградації. З цього можна припустити, що або сталь 2,25Cr-1Mo в експлуатаційних умовах досягла вищого рівня деградації і тому її ШУП зростає сильніше, ніж для менш деградованої сталі 15X2MФА, або інтенсивність деградації сталі 2,25Cr-1Mo є вищою ніж сталі 15X2MФА і тому її ШУП зростає інтенсивніше. Внаслідок цього різниця між сталями за ШУП, виявлена для них у вихідному стані, нівелюється.

Отримані залежності тривалої міцності різних зон 33 сталі 15X2MФА та OM і МШ для сталі 2,25Cr-1Mo проаналізували з використанням параметра Ларсона-Міллера

(LMP), який визначали як $LMP = T \cdot (20 + \lg \tau_f)$, де T – температура випроб, К; τ_f – час до руйнування зразків, год (рис. 3).

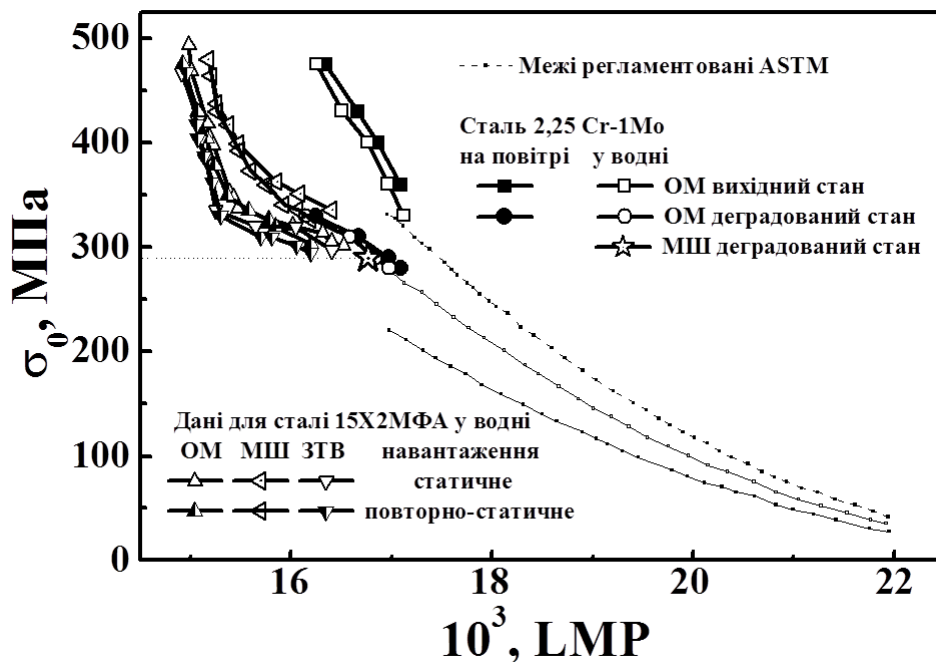


Рисунок 3. Криві тривалої міцності металу різних зон 33 сталі 15X2MФА та сталі 2.25Cr-1Mo в координатах напруження σ_0 від температурно-часового параметра Ларсона-Міллера LMP за температури випроб 450 °С

Figure 3. Long-term strength curves obtained at the test temperature of 450 °С for the metal of the different zones of weld joint for the 15Kh2MFA and 2.25Cr-1Mo steels as the dependences of temperature-time Larson-Miller parameter (LMP) versus the initial stress level σ_0

Результати, отримані за вищих навантажень, екстраполювали на робочі. Для порівняння пунктирними лініями на рисунок нанесли смугу, що згідно з нормативним документом ASTM A542 та відповідає безпечному діапазону експлуатації сталі 2,25Cr-1Mo, яка є закордонним аналогом сталі 15X2MФА.

Аналіз результатів показав, що для сталі 2.25Cr-1Mo за початкового напруження $\sigma_0 = 290$ МПа час до руйнування τ_f МШ, деградованого внаслідок повзучості при 450 °С в експлуатаційних умовах упродовж $79 \cdot 10^3$ год, майже співпадає з τ_f для ОМ, деградованого впродовж $60 \cdot 10^3$ год. На діаграмі точки обох матеріалів (ОМ і МШ) розташувалися на продовженні лінії, що відповідає МШ сталі 15X2MФА та усередненої залежності для сталі 2.25Cr-1Mo, регламентованої стандартом ASTM A542 [9].

Висновки. Виявлено, що тривала міцність усіх зон 33 за повторно-статичного навантаження нижча, ніж за чисто статичного. МШ виявився найчутливішим до впливу повторно-статичних навантажень. Використання параметра Ларсона-Міллера дало змогу показати, що тривала міцність металу різних зон 33 за випроб у водні вже у вихідному стані досягає нижньої межі регламентованого діапазону безпечної експлуатації теплотривких сталей.

Conclusions. It was revealed that the long-term strength of the metal from all weld joint zones under re-static loading is lower than in a purely static one. The weld metal was the most sensitive to the effects of re-static loading. Using Larson-Miller parameter it was shown that long-term strength of the metal of different zones of the welded joint tested in hydrogen

already in the initial state reached the lower limit of the regulated range for guarantee safe operation of the heat resistant steels.

Список використаної літератури

1. Student, O.Z. An accelerated method of hydrogen degradation of structural steels by thermocycling / O.Z. Student // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1998. – 34, № 4. – С. 45 – 52. (Student O.Z. Accelerated Method for Hydrogen Degradation of Structural Steel // Materials Science. – 1998. – 34, 4. – P. 497 – 507).
2. Студент, О.З. Вплив тривалої експлуатації сталі 12Х1МФ з різних зон гину парогону ТЕС на її механічні характеристики [Текст] / О.З. Студент, Л.М. Свірська, І.Р. Дзіоба // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2012, – 48, № 2. – С. 111 – 118. (Influence of the long-term operation of 12Kh1M1F steel from different zones of a bend of steam pipeline of a thermal power plant on its mechanical characteristics / O.Z. Student, L.M. Svirs'ka, I.R. Dzioba // Materials Science – 2012. – 48, № 2. – P. 239 – 246).
3. Студент, О. Вплив теплових змін під час експлуатації парогонів ТЕС на статичну тріщиностійкість сталі 15Х1М1Ф [Текст] / О. Студент, Г. Кречковська, Л. Бабій // Вісник ТНТУ. – Тернопіль. – 2013. – Том 72, № 4. – С 199 – 206.
4. Вплив газоподібного водню на інтенсивність процесу повзучості корпусної сталі реакторів гідрокрекінгу нафти [Текст] / Г.М. Никифорчин, О.З. Студент, А. Загурський, Л.О. Бабій, Г. Матисяк // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій; за заг. ред. Лучка Й.Й. – Львів: Каменяр, 2005. – Вип. 6. – С. 716 – 721.
5. Повзучість у водні експлуатованої сталі 2,25Cr-Mo [Текст] / Л.О. Бабій, О.З. Студент, А. Загурський, А.Д. Марков // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2007. – 43, № 5. – С. 91 – 96. (Babii L.O. Creep of degraded 2.25 Cr-Mo steel in hydrogen / L.O. Babii, O.Z. Student, A. Zagorski, A.D. Markov // Materials Science – 2007. – 43, 5. – P. 701 – 707).
6. Robertson, I.M. Hydrogen effects on plasticity / I.M. Robertson, H.K. Birnbaum, P. Sofronis // In: Dislocations in Solids / Eds. by J.P. Hirth, L. Kubin. – Oxford: Elsevier, 2009. – Vol. 15. – P. 249–294.
7. Власов, Н.М. Влияние атомов водорода на подвижность краевой дислокации [Текст] / Н.М. Власов, В.А. Зазноба // Физика твердого тела. – 1999. – 41. – вып. 3. – С. 451–453.
8. Студент, О.З. Особливості впливу водню на властивості і механізм руйнування металу зварних з'єднань паропроводів ТЕС [Текст] / О.З. Студент, А.Д. Марков, Г.М. Никифорчин // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2006. – 42, № 4. – С. 26 – 35. (Specific features of the influence of hydrogen on the properties and mechanism of fracture of the metal of welded joints of steam pipelines at thermal power plants / O.Z. Student, A.D. Markov, H.M. Nykyforchyn // Materials Science – 2006. – 42, № 4. – P. 451 – 460).
9. Data sheets on the elevated temperature properties of quenched and tempered 2.25Cr-1Mo steel plates for pressure vessels (ASTM A542) // NIRM data sheet. – 1991. – 36 A.

Отримано 14.09.2015

УДК 539.3

Сергій Тинчук, канд. техн. наук

Національний університет водного господарства та природокористування

ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ БАГАТОШАРОВИХ ПОКРИТТІВ З ДЕФЕКТАМИ НА ЖОРСТКІЙ ОСНОВІ

Резюме. Для дослідження напружено-деформованого стану (НДС) багатошарових плит на жорсткій основі запропоновано структурно-континуальну уточнену модель безмоментного симетричного НДС. Розрахункова схема поперечно навантаженої плити утворюється симетричною добудовою плити відносно поверхні контакту з основою, а навантаження на таку плиту подвійної товщини прикладається з двох сторін, причому, симетрично щодо її середньої поверхні. НДС плити