

УДК 620.178.3

ЕКСПЛУАТАЦІЙНА ДЕГРАДАЦІЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ ЗА ЇХ ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

О. І. ЗВІРКО, Г. М. НИКИФОРЧИН, О. Т. ЦИРУЛЬНИК,
В. А. ВОЛОШИН, О. І. ВЕНГРИНІЮК

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

Проаналізовано особливості оцінювання експлуатаційної деградації конструкційних сталей в умовах їх циклічного навантаження. Взято до уваги двостадійність цього процесу, яка полягає у домінуванні спочатку деформаційного циклічного зміцнення з подальшим інтенсивним розвитком розсіяної в об'ємі металу мікропошкоженості. Розмежовано вплив експлуатаційного циклічного навантаження сталей на комплекс важливих для їх роботоздатності базових механічних властивостей та на широкий спектр характеристик втомної міцності. У першому випадку це характеристики опору крихкому руйнуванню, зокрема, ударна в'язкість та тріщиностійкість, у другому – втомному руйнуванню, визначені на гладких зразках та зразках з тріщинами. Розглянуто вплив корозивно-наводнювальних середовищ на інтенсивність експлуатаційної деградації сталей за їх циклічного навантаження.

Ключові слова: *сталь, експлуатаційна деградація, циклічне навантаження, механічні властивості, корозійно-втомний ріст тріщини, водневе розтріскування.*

The features of assessing the operational degradation of structural steels under their cyclic loading are analyzed. The two-stage process of steel degradation is taken into account. It consists in the dominance of cyclic hardening at first with the subsequent intensive development of microdamages dissipated in the metal bulk. The influence of operational cyclic loading of steels on the complex of basic mechanical properties important for their serviceability and on a wide range of fatigue strength characteristics is distinguished. In the first case, these are the characteristics of resistance to brittle fracture, in particular, impact strength and fracture toughness, in the second one – fatigue resistance, determined using smooth specimens and specimens with cracks. The influence of corrosive environments on the intensity of operational degradation of steels under their cyclic loading is considered.

Keywords: *steel, operational degradation, cyclic loading, mechanical properties, corrosion-fatigue crack growth, hydrogen cracking.*

Вступ. Втомна міцність конструкційних сталей є важливою інженерно-науковою проблемою, яку детально вивчають уже більше сторіччя [1]. Здебільшого лабораторні дослідження здійснюють на зразках під час їх циклічного навантаження за різних механічних і температурних умов, а також дії зовнішніх середовищ. З іншого боку, важливо вивчити фізико-механічний стан металу після його тривалої експлуатації, щоб оцінити ступінь його деградації та обґрунтувати його роботоздатність [2]. Останнім часом приділяють особливу увагу деградації сталей відповідальних інженерних об'єктів, зокрема тих, які зазнають циклічного навантаження [2, 3]. Аналізують широкий спектр характеристик втомної міцності у кількох напрямках під час досліджень експлуатаційної деградації конструкційних сталей. Насамперед порівнюють чутливість різних механічних властивостей для

оцінювання рівня деградації сталей, при цьому вважають, що найчутливіші характеристики опору крихкому руйнуванню – це ударна в'язкість та тріщиностійкість [4, 5]. З показників втомної міцності найдослідженіші ті, які описують ріст втомних тріщин і загалом також характеризують опір металу крихкому руйнуванню [6–11]. Окремо слід аналізувати опір втомному руйнуванню сталей, визначений на гладких зразках, оскільки тоді домінуючу роль відіграє стадія зародження втомної тріщини [12–14]. Важливою є ефективність використання різних показників втомного руйнування для вивчення деградації сталей незалежно від того чи експлуатували сталь за циклічного навантаження.

Інший актуальний напрям досліджень – оцінювання поточного стану сталей після їх експлуатації за умов циклічного навантаження. Для цього важливі не тільки показники втомного руйнування, але й інші механічні властивості, чутливі до деградації, зокрема, характеристики опору крихкому руйнуванню [5, 15, 16]. Відповідно виникає питання про порівняльний аналіз ефективності застосування різних механічних властивостей для оцінювання поточного стану металу, беручи до уваги не тільки їх чутливість до деградації, але й простоту їх визначення.

Металоконструкції тривалої експлуатації часто зазнають агресивної дії корозивно-наводнювальних середовищ, які роблять свій внесок у деградацію сталей та ефективність методів її оцінювання, оскільки вона відбувається за сумісної дії робочих напружень та абсорбованого металом водню. Тут слід враховувати різні механізми впливу водню на механічну поведінку сталей [8, 14, 17–20].

Нижче проаналізовано деякі аспекти в оцінюванні експлуатаційної деградації конструкційних сталей з урахуванням циклічного навантаження.

Чутливість показників опору втомному руйнуванню сталей до їх експлуатаційної деградації. Аналізували з урахуванням стадійності деградації, яку зводять до деформаційного старіння сталей та розвитку в них розсіяної мікропошкодженості [3, 5]. Очевидно, що за циклічного навантаження сталей деформаційне старіння необов'язкове, достатньо деформаційного зміцнення, яке також спричиняє підвищення міцності, з якою на загальних засадах корелює і втомна міцність. Зокрема, показано [21, 22], що попереднє пластичне деформування підвищує опір втомі циклічно зміцнених матеріалів. Водночас характеристики опору крихкому руйнуванню однозначно визначальні для оцінювання стану металу на стадії розвитку пошкодженості.

Загальновідомо, що залежність від міцності, з одного боку, характеристик втомної міцності, наприклад, границі витривалості (крива 1, рис. 1), а з іншого – показників опору крихкому руйнуванню (крива 2), має протилежний характер. Ці фундаментальні у механіці та матеріалознавстві залежності пояснюють можливі суперечливі тенденції у закономірностях зміни втомної міцності сталей під час їх експлуатації (рис. 2). Для циклічно зміцнювальних матеріалів, що загалом властиво вуглецевим та низьколегованим сталям, експлуатаційне циклічне навантаження зумовлює зростання поточного рівня міцності. Це відповідно до реалізації залежності (1) підвищує втомну міцність металу та формує стадію I деградації (рис. 2). Очевидно, що стадія I для сталей, які експлуатують за дії циклічного навантаження, завершиться раніше, ніж за його відсутності, оскільки воно інтенсифікує розвиток розсіяної пошкодженості, тобто прискорює початок стадії II експлуатаційної деградації.

На стадії II розвитку розсіяної пошкодженості різкіше порівняно зі стадією деформаційного зміцнення знижується опір крихкому руйнуванню, тобто в експлуатаційній деградації сталей проявляється залежність (2), подана на рис. 1. Це зумовлює зниження границі витривалості σ_{-1} під час експлуатації, при цьому характер зміни границі витривалості та показників опору крихкому руйнуванню є аналогічним [2]. Очевидно, що чинники, які прискорюють розвиток мікропошко-

дженості в металі, пришвидшуватимуть початок стадії II деградації сталей. Зокрема, за наводнювальних властивостей агресивного середовища сталь абсорбуватиме водень. Вплив цього чинника на стадійність деградації втомної міцності сталей подано на рис. 2 окремою залежністю, яка ще більше звужує стадію I їх деградації за показником границі витривалості.

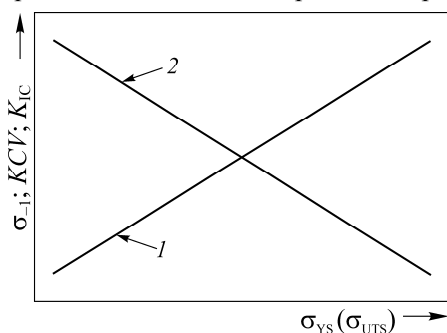


Рис. 1. Fig. 1.

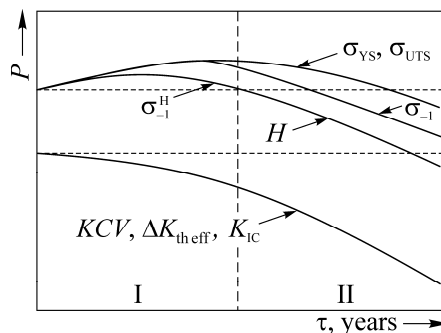


Рис. 2. Fig. 2.

Рис. 1. Залежність границі витривалості σ_{-1} (1), а також ударної в'язкості KCV та в'язкості руйнування K_{IC} (2) від міцності сталей (границі плинності σ_{YS} та міцності σ_{UTS}).

Fig. 1. Dependences of the endurance limit σ_{-1} (1), and impact toughness KCV and fracture toughness K_{IC} (2) on steel strength (yield strength σ_{YS} and ultimate σ_{UTS} strength).

Рис. 2. Схема стадійної деградації сталей: стадія I – деформаційне старіння (зміцнення); стадія II – розвиток розсіяної пошкодженості. P – параметр; H – вплив наводнювання.

Fig. 2. Scheme of stages of steel degradation: stage I – deformation aging (strengthening); stage II – dissipated damaging. P – parameter; H – hydrogenation impact.

На рис. 3 наведено зміну базових механічних характеристик міцності, границі витривалості σ_{-1} (симетричний цикл навантаження) на базі 10^7 cycles для нержавної сталі 20X13 лопатки циліндра низького тиску парової турбіни ТЕС у вихідному стані та після $\sim 3 \cdot 10^5$ h експлуатації [23]. Опір росту тріщини за статичного навантаження визначали з використанням методу J -інтеграла за стартом втомної тріщини за активного навантаження, а за циклічного – на основі порогів втоми ΔK_{th} і $\Delta K_{th, eff}$, визначених без та з урахуванням ефекту закриття тріщини відповідно. На основі показника λ , який оцінює відносну зміну відповідних значень внаслідок експлуатації ($\lambda = \frac{P_{exp} - P_{in}}{P_{in}} \cdot 100\%$, де P_{in} та P_{exp} – характеристики

металу у вихідному стані та після експлуатації, відповідно), чітко продемонстровано, що сталь в результаті тривалої експлуатації зміцнилася, однак її границя витривалості суттєво знизилась. Тобто границі міцності та витривалості не змінюються симбатно як зазвичай. Це можна пояснити інтенсивним розвитком мікропошкодженості у сталі впродовж її експлуатації, тобто реалізацією стадії II деградації металу і, відповідно, домінуванням процесів, які відображає крива 2 на рис. 1. Крім того, чутливість показника σ_{-1} до експлуатаційної деградації не нижча, ніж характеристик опору росту тріщин за показниками J_{IC} чи $\Delta K_{th, eff}$. Зазначимо, що номінальний поріг втоми ΔK_{th} виявився мало ефективним для оцінювання деградації, оскільки експлуатація сталі спричинила посилення ефекту закриття тріщини, що майже нівелювало відмінності у порогах втоми вихідного та експлуатованого металу – вони відрізняються лише на 10%.

Однозначнішим є негативний вплив тривалої експлуатації сталей на законмірності втомного росту тріщини, оскільки як деформаційне зміцнення, так і пошкодженість знижують опори втомному руйнуванню на стадії росту тріщини та

крихкому руйнуванню загалом. Однак тут слід окремо розглядати вплив експлуатації на припороговий ріст тріщини і на швидкість росту тріщини da/dN на середньоамплітудній ділянці кінетичної діаграми втомного руйнування $da/dN-\Delta K$, де ΔK – розмах коефіцієнта інтенсивності напружень у її вершині. У першому випадку закриття тріщини істотно впливає на поріг втоми ΔK_{th} , а експлуатація посилює процес через зростання шорсткості поверхні зламу. Звідси номінальний поріг втоми може навіть зростати, однак ефективний поріг втоми $\Delta K_{th\,eff}$, визначений з урахуванням закриття тріщини, в експлуатованій сталі знижується. Це підкреслює важливість використання для оцінювання експлуатаційної деградації сталей характеристики $\Delta K_{th\,eff}$ як механічної рушійної сили втомного росту тріщини.

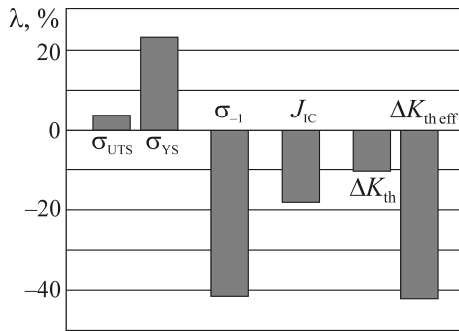


Рис. 3. Чутливість механічних характеристик сталі 20X13 (міцності σ_{YS} та σ_{UTS} , границі витривалості σ_{-1} , в'язкості руйнування J_{IC} та номінального ΔK_{th} і ефективного $\Delta K_{th\,eff}$ порогів втоми) до її експлуатаційної деградації.

Fig. 3. Sensitivity of the mechanical characteristics of 20X13 steel (strength σ_{YS} and σ_{UTS} , endurance limit σ_{-1} , fracture toughness J_{IC} and fatigue threshold ΔK_{th} and effective fatigue threshold $\Delta K_{th\,eff}$) prior to in-service degradation.

Роль наводнювального середовища в експлуатаційній деградації сталей.

Деградація проявляється у двох принципових аспектах. Якщо можливе наводнювання металу в об'ємі внаслідок його електрохімічної взаємодії з корозивним середовищем, то він деградує за сумісної дії напружень і водню, що впливає й на механічні характеристики сталей, в тому числі на показники втомної міцності. З іншого боку, взаємодія водню зі сталями у вихідному стані та після тривалої експлуатації є різною, і, відповідно, це по-різному впливає на їх механічну поведінку. Цей аспект можна використати для підвищення чутливості механічних характеристик до деградації сталей. Зокрема, попереднє електролітичне наводнювання сталей у вихідному та експлуатованому стані дає змогу оцінити експлуатаційну деградацію сталі (рис. 4), оскільки чутливість експлуатованого металу до дії водню є здебільшого вищою.

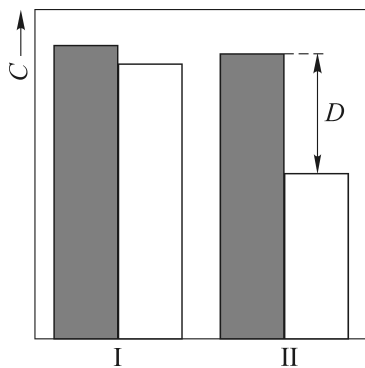


Рис. 4. Підвищення чутливості характеристик пластичності до експлуатаційної деградації сталей внаслідок застосування попереднього наводнювання: випробування розтягом без (I) та після попереднього наводнювання (II); ■ – вихідний стан; □ – після експлуатації. C – зміна пластичності; D – зниження пластичності.

Fig. 4. Increase of the sensitivity of plasticity characteristics to operational degradation of steels by usage of preliminary hydrogenation: tensile testing without (I) and after preliminary hydrogenation (II); ■ – as-received state; □ – after operation. C – change in plasticity; D – drop in plasticity.

За домінування водневого механізму впливу корозивного середовища [24] ефективно оцінювати стан експлуатованих сталей за показниками корозійно-втомного росту тріщини. Такий механізм реалізується головню на середньоам-

плітудній ділянці діаграми $da/dN-\Delta K$, коли ефектом закриття тріщини можна нехтувати, однак проявляється схильність деградованих сталей до корозійного розтріскування. Це продемонстровано на прикладі дослідження впливу розчину NS4, що моделює ґрунтове середовище, на втомний ріст тріщини в експлуатованій 30 років сталі 17Г1С магістрального газопроводу з урахуванням високої асиметрії циклу навантаження $R = 0,9$ та накладання потенціалу катодного захисту $E_{cp} = -0,98$ V, який на $\sim 0,5$ V негативніший потенціалу корозії E_{corr} (рис. 5).

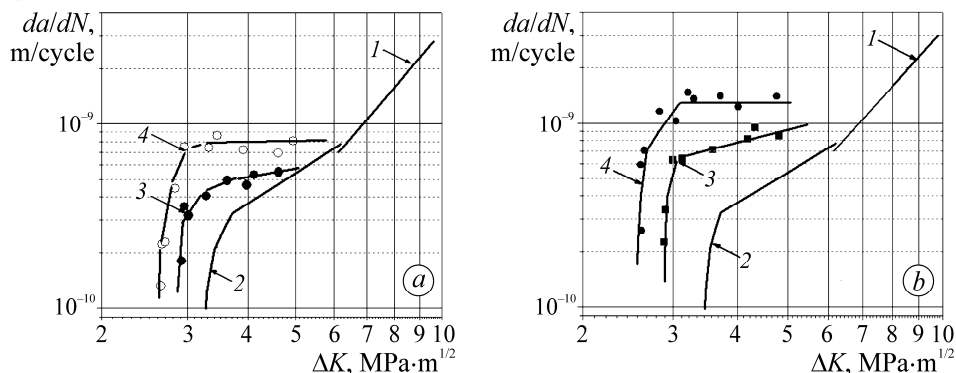


Рис. 5. Діаграми втомного руйнування сталі 17Г1С у вихідному (а) та експлуатованому (б) станах у повітрі (1, 2) та у розчині NS4 за E_{corr} (3) і E_{cp} (4) за $R = 0,1$ (1) і $0,9$ (2–4) та частоти 5 (1, 2) і $0,3$ Hz (3, 4).

Fig. 5. Diagrams of fatigue fracture of the 17Г1С steel in unoperated (a) and operated (b) states in air (1, 2) and NS4 solution at E_{corr} (3) and E_{cp} (4) for $R = 0.1$ (1) and 0.9 (2–4) at a frequency of 5 (1, 2) and 0.3 Hz (3, 4).

Встановлено, що за високого рівня R та дії корозивного середовища у середньоамплітудній області ΔK присутня платоподібна ділянка, тобто швидкість росту тріщини практично не залежить від рівня ΔK . Цей ефект посилюється накладанням катодної поляризації, що свідчить про відповідальність механізму водневого розтріскування у кінетиці втомного росту тріщини. Крім того, за високої асиметрії циклу навантаження тривала експлуатація сталі інтенсифікує вплив середовища на ріст тріщини, сильніше за потенціалу катодного захисту, що свідчить на користь твердження про підвищення схильності деградованої сталі до водневого розтріскування.

ВИСНОВКИ

Розглянуто специфіку оцінювання експлуатаційної деградації сталей, спричинену їх циклічним навантаженням. Аналізували з урахуванням двостадійності деградації, яку зводять до деформаційного змінення сталей та розвитку в них розсіяної мікропошкодженості. На першій стадії процесу домінує зростання втомної міцності, тоді як на другій – зниження опору крихкому руйнуванню. На прикладі оцінювання експлуатаційної деградації нержавної сталі 20Х13 лопатки парової турбіни ТЕС показано істотне зниження границі витривалості та ефективного порогу втоми, які є високочутливими показниками. Стосовно використання показників втомного росту тріщини для порівняння вихідного та експлуатованого металу слід розрізняти припорогові та середньоамплітудні ділянки кінетичних діаграм. Для припорогових ділянок важливо враховувати ефект закриття тріщини, а для середньоамплітудних – вплив корозивних середовищ, особливо наводнювальних. В останньому проявляється схильність експлуатованих сталей до водневого розтріскування.

1. Schijve J. Fatigue of structures and materials in the 20th century and the state of the art // Int. J. Fatig. – 2003. – 25, № 8. – P. 679–702.

2. *Sosnovskii L. A. and Vorob'ev V. V.* The influence of long operation on fatigue strength of pipe steel // *Strength Mat.* – 2000. – **32**, № 6. – P. 523–529.
3. *Nykyforchyn H. and Zvirko O.* Operational degradation of fatigue strength of structural steels: role of corrosive-hydrogenating environments // Chapter in Book: *Fatigue and Fracture of Materials and Structures.* – Cham: Springer, 2022. – 6 p. (In press)
4. *Influence of loading direction on the static and fatigue fracture properties of the long term operated metallic materials / G. Lesiuk, B. Rymysa, J. Rabięga, J. A. F. O. Correia, A. M. P. De Jesus, and R. Calçada // Eng. Fail. Anal.* – 2019. – **96**. – P. 409–425.
5. *Zvirko O. I.* In-service degradation of structural steels (A Survey) // *Materials Science.* – 2022. – **57**, № 3. – P. 319–330.
6. *Polishchuk L. K., Kharchenko H. V., and Zvirko O. I.* Corrosion-fatigue crack-growth resistance of steel of the boom of a clamp-forming machine // *Materials Science.* – 2015. – **51**, № 2. – P. 229–234.
7. *Lesiuk G. and Szata M.* Kinetics of fatigue crack growth and crack paths in the old puddled steel after 100-years operating time // *Frat. Integrita Struct.* – 2015. – **9**, № 34. – P. 290–299.
8. *Assessment of resistance to fatigue crack growth of natural gas line pipe steels carrying gas mixed with hydrogen / M. Dadfarnia, P. Sofronis, J. Brouwer, and S. Sosa // Int. J. Hydrogen Energy.* – 2019. – **44**, № 21. – P. 10808–10822.
9. *Dmytrakh I. M., Leshchak R. L., and Syrotyuk A. M.* Influence of sodium nitrite concentration in aqueous corrosion solution on fatigue crack growth in carbon pipeline steel // *Int. J. Fatig.* – 2019. – **128**. – Article number: 105192.
10. *Ranking of the mechanical characteristics of steels of steam pipelines of thermal power plants by their sensitivity to in-service degradation / O. Z. Student, H. V. Krechkovska, L. M. Svirska, B. I. Kindratskyi, and V. V. Shyrovkov // Materials Science.* – 2021. – **57**, № 3. – P. 404–412.
11. *Papuga J., Margetin M., and Chmelko V.* Various parameters of the multiaxial variable amplitude loading and their effect on fatigue life and fatigue life computation // *Fatig. Fract. Eng. Mat. Struct.* – 2021. – **44**, № 10. – P. 2890–2912.
12. *Study on the mechanism of high-cycle corrosion fatigue crack initiation in X80 steel / W. Zhao, Y. Wang, T. Zhang, and Y. Wang // Corr. Sci.* – 2012. – **57**. – P. 99–103.
13. *Mughrabi H.* Microstructural fatigue mechanisms: Cyclic slip irreversibility, crack initiation, non-linear elastic damage analysis // *Int. J. Fatig.* – 2013. – **57**. – P. 2–8.
14. *Jeddi D. and Palin-Luc T.* A review about the effects of structural and operational factors on the gigacycle fatigue of steels // *Fatig. Fract. Eng. Mat. Struct.* – 2018. – **41**. – P. 969–990.
15. *Role of in-service conditions in operational degradation of mechanical properties of portal cranes steel / O. Nemchuk, M. Hredil, V. Pustovoy, and O. Nesterov // Proc. Struct. Integrity.* – 2019. – **16**. – P. 245–251.
16. *Nemchuk O. O. and Nesterov O. A.* In-service brittle fracture resistance degradation of steel in a ship-to-shore portal crane // *Strength Mat.* – 2020. – **52**, № 2. – P. 275–280.
17. *Liu Q. and Atręns A.* A critical review of the influence of hydrogen on the mechanical properties of medium-strength steels // *Corr. Rev.* – 2013. – **31**, № 3–6. – P. 85–103.
18. *Effect of hydrogen charging on the mechanical properties of advanced high strength steels / T. Depover, D. Pérez Escobar, E. Wallaert, Z. Zermout, and K. Verbeken // Int. J. Hydrogen Energy.* – 2014. – **39**, № 9. – P. 4647–4656.
19. *Specimen thickness effect on the property of hydrogen embrittlement in single edge notch tension testing of high strength pipeline steel / Y. Li, B. Gong, X. Li, C. Deng, and D. Wang // Int. J. Hydrogen Energy.* – 2018. – **43**, № 32. – P. 15575–15585.
20. *Mohtadi-Bonab M. A., Masoumi M., and Szpunar J. A.* A comparative fracture analysis on as-received and electrochemically hydrogen charged API X60 and API X60SS pipeline steels subjected to tensile testing // *Eng. Fail. Anal.* – 2021. – **129**. – Article number: 105721.
21. *Kang M., Aono Y., and Noguchi H.* Effect of prestrain on and prediction of fatigue limit in carbon steel // *Int. J. Fatig.* – 2007. – **29**. – P. 1855–1862.
22. *Effect of cyclic stresses below the endurance limit on the fatigue life of 40Cr steel / L. H. Zhao, J. Z. Feng, and S. L. Zheng // Strength Mat.* – 2018. – **50**, № 1. – P. 2–10.
23. *Nykyforchyn H. M., Tkachuk Yu. M., and Student O. Z.* In-service degradation of 20Kh13 steel for blades of steam turbines of thermal power plants // *Materials Science.* – 2012. – **47**, № 4. – P. 447–456.
24. *Voloshyn V. A., Zvirko O. I., and Sydor P. Y.* Influence of the compositions of neutral soil media on the corrosion cracking of pipe steel // *Materials Science.* – 2015. – **50**, № 5. – P. 671–675.

Одержано 27.01.2022