



УДК 621.791.11:693

THE INFLUENCE THE MAGNITUDE OF STRENSSES IN THE METAL STRUKTURE AND OPERATING CONDITIONS ON THE CRACK RESISTENCE AND DUREBILITY OF MATERIALS OF BUSLDSNG STRUCTURES AND BUILDINGS

ВПЛИВ ВЕЛИЧИНИ НАПРУЖЕНЬ, СТРУКТУРИ МЕТАЛІВ ТА УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ НА ТРІЩИНІСТІЙКІСТЬ ТА ДОВГОВІЧНІСТЬ МАТЕРІАЛІВ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ І СПОРУД

Makarenko Valeriy / Макаренко Валерій Дмитрович

професор, д-р техн. наук, професор

Київського національного університету будівництва і архітектури (КНУБА)

ORCID :0000-0001-9178-9657

Savenko Volodymyr / Савенко Володимир Іванович

д-р техн. наук, (ФРН) професор

Національного університету будівництва і архітектури (КНУБА),

академік Академії будівництва України (АБУ),

ORCID:0000-0002-1490-6730;

Makarenko Yulija / Макаренко Юлія Валерійовна

магістерка університету "Манітобо" (Канада),

ORCID:0000-0001-9113-4288 ,

Gots Volodymyr / Гоц Володимир Іванович

д-р техн. наук, професор КНУБА, академік АБУ

ORCID:0000-0001-7702-1609;

Tereshchuk Mykola / Терещук Микола Олександрович

доктор філософії, доктор будівництва Академії будівництва України (АБУ)

докторант КНУБА, академік АБУ

ORCID : 0000-0002-4444-3677

Анотація. Руйнування сталей в значній мірі відбуваються під впливом напружень, виду і стану матеріалу конструкції, навантажень, які характеризуються знаком, величиною, жорсткістю схеми, особливо в зоні зварювальних з'єднань стиків, концентрацією, циклічністю напружень, запасом і концентрацією пружної потенційної енергії. Більша частина зварних конструкцій, зазнавши впливу корозійно активних середовищ, представляє собою конструкції оболонкового типу (реактори, ємності, балони, трубопроводи, корпусні конструкції, станки, мости, рейкові шляхи, тощо) з характерним довівним напруженням станом, тому вплив факторів напруженості і виду навантажень вивчався стосовно до цього стану на матеріалах, які мають різну міцність, пластичність, ступінь зміцнення чутливості до концентрації напружень в середовищах, які спричиняють корозійне розтріскування.

Для оцінки експлуатаційно-корозійної міцності проводяться порівняльні випробування зварних з'єднань і основного металу в ненапруженому і напруженому станах. Методи випробувань для оцінки стійкості можна класифікувати по наступних ознаках: 1) по цільовому призначенню; 2) по типу застосованого для випробувань об'єкту; 3) по виду напруженого стану; 4) по типах дослідних середовищ; 5) по показнику стійкості в залежності від виду корозійного руйнування.

Аналіз літературних джерел вітчизняних і зарубіжних вчених показав, а також практичні дані свідчать, що отримані дані в значній більшості мають протиріччя невизначеність, відсутні кількісно обгрунтовані рекомендації щодо практичних застосувань



з підвищення корозійно-механічної стійкості будівельних конструкцій, трубопроводних конструкцій та різного призначення устаткування та пристроїв, працюючих в нафтогазовій галузі, будівництві, машинобудуванні та ін., а тому з'явилися вимоги до вивчення причин наслідків неякісного захисту самих конструкцій, труб і зварювальних з'єднань, що вимагає проведення додаткових експериментальних досліджень. Аналіз досліджень, викладених в літературних джерелах, показує, що в теперішній час актуальним є дослідження таких питань, як впливу концентраторів напружень зварювальних з'єднань на розвиток корозійних тріщин, які приводять до руйнувань спеціальних сталей, виготовлених з удосконалених шляхом економного модифікування сталей, зокрема ванадієм, ніобієм, РЗМ та ін. елементами. Крім того, результати досліджень, які наведені у вітчизняних і зарубіжних журналах відрізняються протиріччям, так як проводилися на різних сталях з використанням різних методик і критеріїв оцінки, що ускладнюють порівняння результатів і експериментів, а тому не надає однозначної оцінки стосовно спротиву сталей в залежності від навантаження, напружень дефектів структури та ін. Це спричиняє необхідність проведення системних комплексних експериментальних досліджень, що може допомогти в розробці шляхів подовження експлуатаційного ресурсу металевих конструкцій, трубопроводів, оболонок тощо. Крім того очевидна недостатність підтримки державою вчених і науково-дослідних програм та організацій у проведенні фундаментальних досліджень що не сприяє розвитку науки.

Ключові слова: спеціальні сталі, концентратори напружень, стійкість будівельних конструкцій, корпусні конструкції, корозійно активні середовища, корозійне розтріскування.

Вступ

Питання довговічності і надійності будівельних конструкцій та споруд, критичної інфраструктури, машин і механізмів за умови зношеності та впливу критичних навантажень потребує ретельного дослідження, вивчення та постійного моніторингу в силу життєво важливої необхідності, безпеки життя людей і всього суспільства.

Основний текст

Дослідженнями по впливу величини напружень виявленню компонента напружень, визначаючого розтріскування і траєкторію тріщини встановлено, що корозійні тріщини, спричинені розтягувальними компонентами напружень, незалежно від методу навантаження. Для усіх металів термін до розтріскування невідмінно зменшується по мірі росту напружень. Збільшення напружень сприяє послабленню і порушенню захисних плівок, спричиняє концентрацію пружно-пластичних деформацій в мікротріщинах у вершині розвинутої тріщини і інтенсифікує протікання механічних напружень і пов'язаних з концентрацією деформації, корозійних і сорбційних процесів. Інтенсифікація усіх сполучених процесів при збільшенні напружень приводить в підсумку до прискорення корозійного розтріскування. Разом з тим, на кривих корозійного розтріскування



$\sigma - \ell$ у більшості випадків виявляється границя мінімальних напружень $\sigma_{ГР}$, нижче яких розтріскування не наступає на протязі тривалого терміну чи не відбувається взагалі. Величина граничних напружень залежить від конкретних умов, властивостей матеріалу, напруженого стану, корозійного середовища. Границя мінімальних напружень помічається при навантаженні як ззовні, так і залишковими зварювальними напруженнями.

Результати експериментальних досліджень викладені на мал.1,3, звідки видно, що орієнтовні значення $\sigma_{ГР}$ для зварних з'єднань на сталі ВСт3сп в середовищі NACE складають $\approx \sigma_T$, а із сталі 18ХН9Ф відповідно $0.4\sigma_T$, а сталі 08ХМЧА - $\approx 0.5\sigma_T$, для сталей Ст20А, 40ХН і 06Г2БА відповідно $0.5\sigma_T$, $0.6\sigma_T$, $0.8\sigma_T$. Відсутність розтріскування при значеннях напружень менших граничних можна пояснити недостатньою концентрацією напружень і малим запасом потенційної енергії необхідних для виникнення і розвитку корозійної тріщини (див. рис..1,2).

При наявності не знятого поля залишкових зварювальних напружень при зміні зовнішнього навантаження границя напружень не наступає, так як при малих значеннях напружень від зовнішнього навантаження руйнування обумовлено залишковими зварювальними напруженнями (див. рис.2). Порівняння кривих корозійного розтріскування зварюваних з'єднань і основного металу показує, що стійкість зварювальних з'єднань, в силу розглянутих раніше причин, як правило, нижче, чим у основного металу.

Таким чином, з рис.1,2 виходить, що розтріскування проходить інтенсивніше при постійному навантаженні в порівнянні з постійною загальною деформацією (зразки сталі Х18Н9Ф – при одновісному розтягуванні). Зміни в металі, спричинені зварюванням, наявність залишкових напружень, жорстка схема напружень суттєво прискорюють розтріскування. Величина граничних напружень в залежності від цих факторів змінюється в меншій мірі.

Результати експериментальних досліджень викладені в роботі показують, що орієнтовні значення $\sigma_{ГР}$ для зварних з'єднань на сталі ВСт3сп в середовищі NACE складають $\approx \sigma_T$, а із сталі 18ХН9Ф відповідно $0.4\sigma_T$, а сталі 08ХМЧА - $\approx$



$0.5\sigma_T$, для сталей Ст20А, 40ХН і 06Г2БА відповідно $0.5\sigma_T$, $0.6\sigma_T$, $0.8\sigma_T$. Відсутність розтріскування при значеннях напружень менших граничних можна пояснити недостатньою концентрацією напружень і малим запасом потенційної енергії, необхідних для виникнення і розвитку корозійної тріщини.

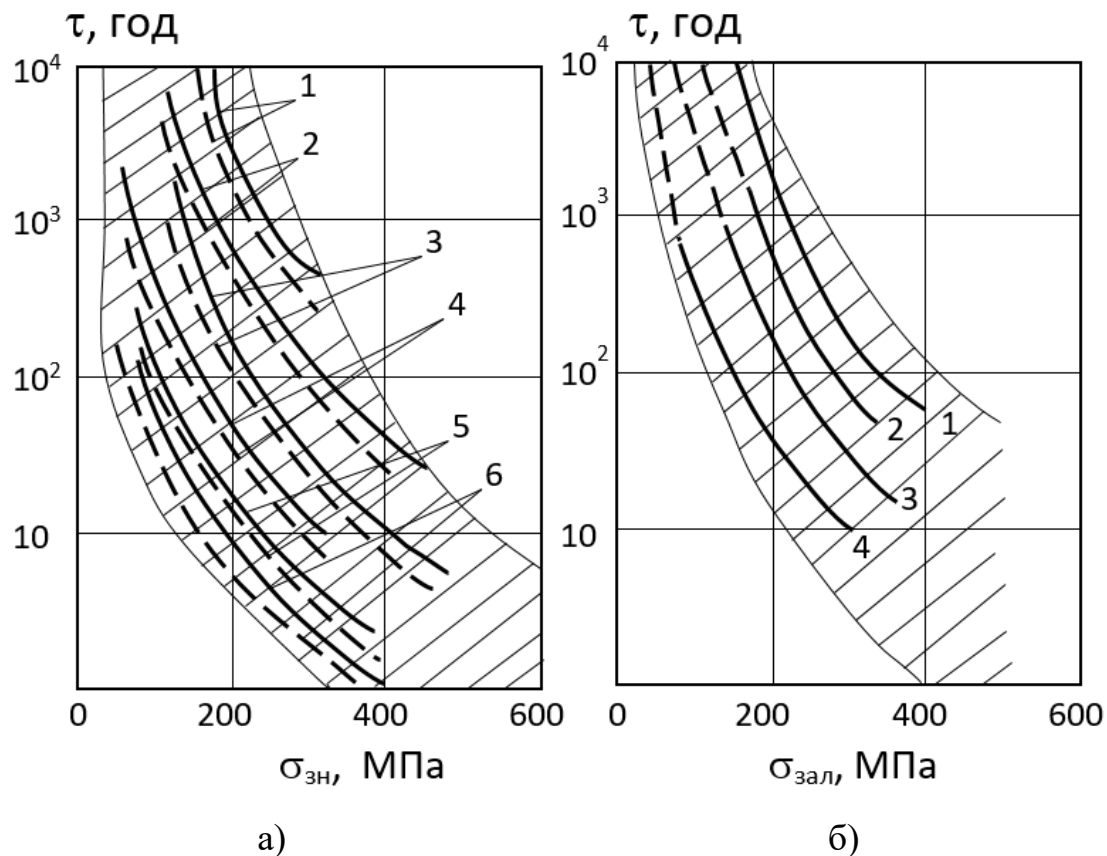


Рис.1 - Вплив величини напруження і виду напруженого стану на корозійне розтріскування в різних середовищах (а).

Позначення: суцільні лінії – зварювальні з'єднання, штрихові - основний метал;

$\sigma_{zh} > 0$; $\sigma_{zal} = 0$. Сталі: 1 – Х18Н9Ф; 2 – ХМЧА; 3 – 06Г2БА; 4 – 40ХН;

5 – Ст20А; 6 – ВСт3сп; 1, 2, 4 – одновісний згин; 3, 5, 6 – одновісне

розтягування; (б) вплив величини напруження і виду напруженого стану на

корозійне розтріскування в різних середовищах. Позначення: суцільні лінії – основний метал; $\sigma_{zh} > 0$; $\sigma_{zal} > 0$. Сталі: 1 – Х18Н9Ф; 2 – ХМЧА; 3 – 06Г2БА;

4 – 40ХН; 1, 2, 3, 4 – одновісне розтягування.

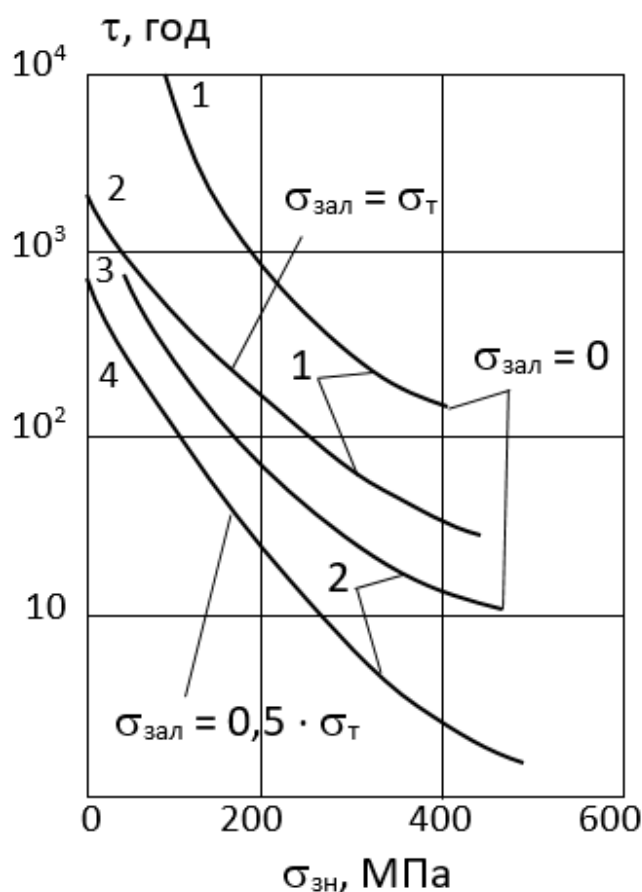


Рис.2 - Вплив величини напруження і виду напруженого стану на корозійне розтріскування в різних середовищах.

Позначення: суцільні лінії – зварювальні з'єднання, штрихові - основний метал;

$\sigma_{zh} = 0$; $\sigma_{zal} > 0$. Сталі: 1 – X18H9Φ; 2 – ХМЧА; 3 – 06Г2БА; 4 – 40ХН;

5 – Ст20А; 6 – ВСт3сп; 1,2 – одновісний згин; 3, 4 – одновісне розтягування.

Руйнуванням від втомленості відбувається під дією повторного або циклічного навантаження. За сучасними уявленнями руйнування металів і полімерів від втомленості зумовлене мікронеоднорідністю структури. Як наслідок, виникає локальна концентрація напружень, що створює місце зародження руйнування від втомленості. Етапи зародження та поширення тріщини від втомленості розділити часто неможливо, а тому існує кілька моделей руйнування (рис.3). На рис.3. видно дві зони: А – утворена внаслідок поступового розвитку тріщини; В – великозерниста, по якій проходить миттєвий злам після ослаблення робочого перерізу тріщинами від втомленості. У крихких матеріалах – це зона великокристалічної будови, для в'язких матеріалів – це зона в'язкого



руйнування (волокниста структура).

Неоднорідність конструкційних матеріалів практично є неминучою через особливості металургійного та технологічного оброблення. Це призводить до утворення тріщин і численних дефектів. Останні повільно наростаючи у процесі експлуатації, зумовлюють руйнування. На рис. 3 показано відповідний приклад. Цей процес інколи пов'язують з напруженням пластичної течії або з межею міцності матеріалу при розтягу. У загальному випадку руйнування дисків спричинено руйнівним напруженням матеріалу та пояснюється різними теоріями.[3-5] Подальші належні дослідження допоможуть зблизити відповідні існуючі уявлення про конструкційну міцність матеріалу.

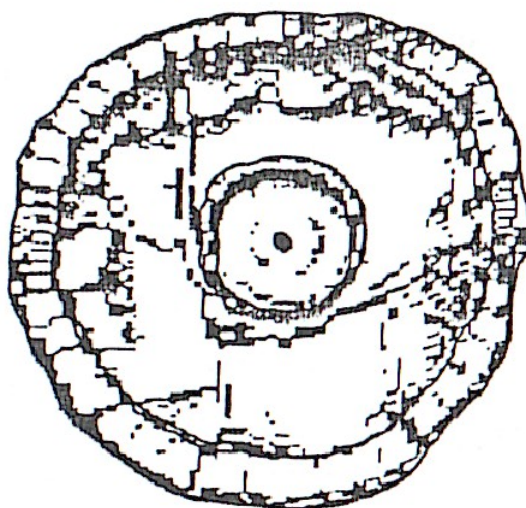


Рис. 3 - Характер руйнування дисків зі сплаву ЕИ437Б за високих температур

Відомо, що для роботи конструкції з армованого матеріалу (наприклад, розтяжної пластинки з отвором) характерне те, що концентрація напружень накладається на неоднорідний напружений стан структури матеріалу, а малі дотичні напруження у зв'язувальному стані інколи стають небезпечнішими, ніж максимальні напруження по контуру. Згідно з розрахунками заштрихована частина армованої пластинки (рис. 4 а) ослаблена коловим отвором, а залишкова – перебуває в однорідному напруженому стані. Характер руйнування пластинки ілюструє дослід. (рис 3,4)

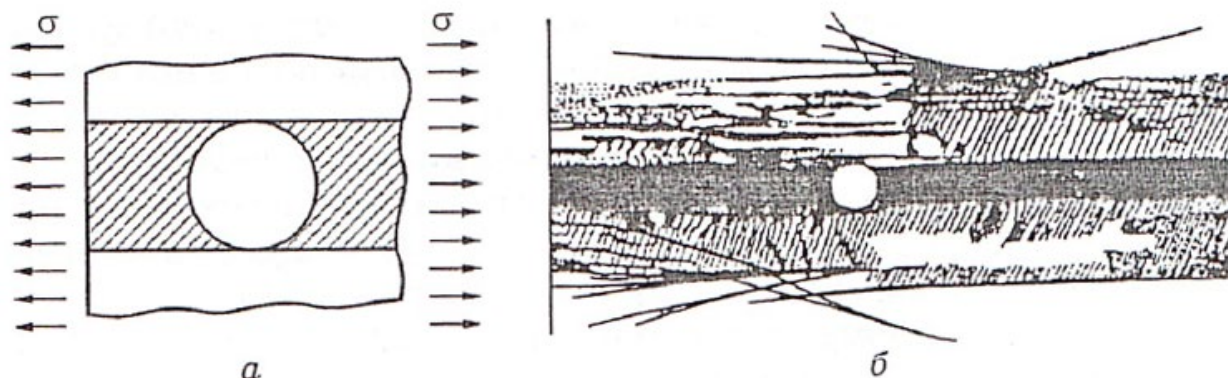


Рис. 4 - Характер руйнування армованої пластинки:

***а** – структура, ослаблена отвором з концентрацією напружень σ ;*

***б** – характер руйнування пластинки.*

Механічні властивості твердого тіла залежать від будови кожного зерна в полікристалічному агрегатному стані, а також від структури і властивостей міжкристалічної речовини. Для вивчення механічних властивостей твердих тіл важливо мати уявлення про структуру матеріалу та її зміну в різних термомеханічних умовах (під час кування, прокату та ін.), подрібнення зерен, утворення, наприклад, волокнистої структури (рис. 5, *а* – лита структура; *б* – волокниста), що приводить до анізотропії властивостей матеріалу.

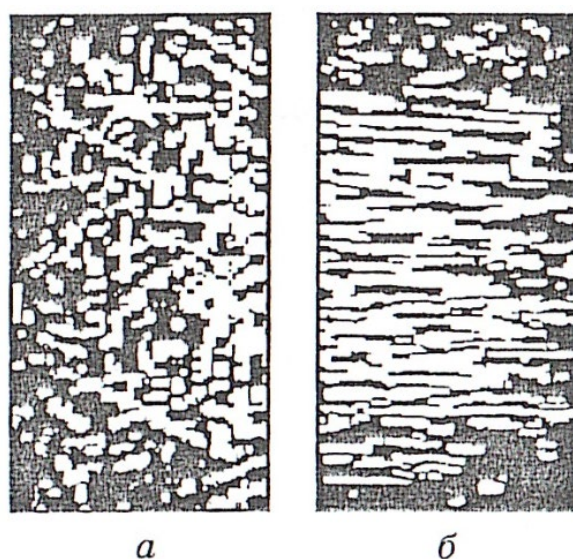


Рис. 5 - Утворення волокнистої структури у процесі подрібнення зерен у різних термомеханічних умовах: *а* – лита структура; *б* – волокниста структура.



Отже, причиною руйнування елементів будівельних конструкцій, у більшості випадків, є фізичні та хімічні чинники. Сучасне обладнання та новітні технології досліджень дозволяють визначити й додаткові фактори, які спричиняють руйнацію будівельних матеріалів та конструкцій. Українські вчені-дослідники вносять значний вклад у розвиток світової інженерної науки, їх праці визнані міжнародною науковою спільнотою.

Висновки та пропозиції

1. Терміни до появи тріщин і руйнування металів скорочується зі збільшенням навантажень, інтенсифікуються корозійні та сорбційні процеси, які також залежать від неоднорідності металів та концентраторів напруження. Корозійні тріщини, спричинені розтягувальними компонентами напружень, незалежать від методу навантаження. Для усіх металів термін до розтріскування невпинно зменшується по мірі росту напружень. Збільшення напружень сприяє послабленню і порушенню захисних плівок, спричиняє концентрацію пружно-пластичних деформацій в мікротріщинах і у вершині розвинутої тріщини і інтенсифікує протікання механічних і пов'язаних з концентрацією деформації, корозійних і сорбційних процесів. Інтенсифікація усіх сполучених процесів при збільшенні напружень приводить в підсумку до прискорення корозійного розтріскування. Разом з тим на кривих корозійного розтріскування $\sigma - \ell$ у більшості випадків виявляється границя мінімальних напружень $\sigma_{ГР}$, нижче яких розтріскування не настає на протязі тривалого терміну чи не відбувається взагалі. Величина граничних напружень залежить від конкретних умов, властивостей матеріалу, напруженого стану, корозійного середовища. Границя мінімальних напружень помічається при навантаженні як ззовні, так і залишковими зварювальними напруженнями.

2. Орієнтовні значення $\sigma_{ГР}$ для зварних з'єднань на сталі ВСтЗсп в середовищі НАСЕ складають $\approx \sigma_T$, а із сталі 18ХН9Ф відповідно $0.4\sigma_T$, а сталі 08ХМЧА - $\approx 0.5\sigma_T$, для сталей Ст20А, 40ХН і 06Г2БА відповідно $0.5\sigma_T$, $0.6\sigma_T$, $0.8\sigma_T$. Відсутність розтріскування при значеннях напружень менших граничних можна пояснити Недостатня концентрація напружень і малий запас потенційної



енергії необхідних для виникнення і розвитку корозійної тріщини пояснює відсутність розтріскування при значеннях напружень менших граничних.

3. Руйнування деталей машин та елементів будівельних конструкцій є в першу чергу фізичні та хімічні чинники. З метою виявлення механічних факторів досліджують наявні силові поля конструкції, встановлюють максимальні напруження біля концентраторів, визначають залишкові напруження й деформації, знаходять дефекти типу тріщин, крихкі зони, дислокації та ін. Для визначення хімічних факторів здійснюють аналіз поверхні в зоні руйнування, з'ясовують характер хімічної реакції в кінці корозійної тріщини, діагностують причини локального змінювання структури матеріалу і т.д. Для усунення небезпеки руйнування потрібно модифікувати необхідним чином конструкцію, замінити матеріал, усунути зовнішні причини, виконати додаткові запобіжні технологічні операції,

4. Наявність структурних включень типу зерен, мікротріщин, дислокацій практично у всіх матеріалах призводить до того, що їхня міцність стає значно меншою за теоретичну. При цьому, чим більша дефектність матеріалу, тим менша міцність за інших однакових умов. Якщо руйнування відбувається під дією повторного або циклічного навантаження, його називають руйнуванням від втомленості. Це явище відкрили У. Ранкіна та А. Веллер понад 100 років тому. Врахування втрати міцності від втомленості покладено в основу проектування й розрахунку більшості динамічно напружених конструкцій та машин. Це пов'язано з необхідністю підвищення експлуатаційної надійності, зниженням ваги й поліпшення економічних показників конструкцій.

Література

1. Макаренко В.Д., Савенко В.І., Гоц В.І., Іванченко Г.М. Корозійна стійкість при динамічному навантаженні будівельних споруд: монографія. – Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя. 2025. – 120 с ISBN 5-8365-1268-88

2. Савенко В.І., Нестеренко І.С., Ключова В.В., Полосенко О.В., Куліков П.М. Про проблеми визнання та впровадження інноваційних технологій і відносин



науковців з державними інститутами. SWorld Journal Issue #27 Part 1 September 2024 – с. 3-13 International periodic journal www.sworldjournal.com D.A.Tsenov Academy of Economics Svishtov (Bulgaria) Index Copernicus Google scholar ISSN 2663-5712 DOI:10.30888/2663-5712.2024-27-00-007

3. Макаренко В.Д., Гоц В.І., Савенко В.І., Владимиров О.В., Макаренко Ю.В. Експериментальні дослідження кінетики росту тріщин та несучої здатності трубних сталей підземних систем водовідведення//Опір матеріалів і теорія споруд: Вип. №110.- 2023, С.469-482

4. Гоц В , Макаренко В., Войтович О., Макаренко Ю.,, Савенко В., Владимиров О., Стогній О., Азутов В Дослідження впливу корозійного середовища на тривалу втомленість сталевих каналізаційних конструкцій наук-тех журн. Проблеми водопостачання , водовідведення та гідравліки. Випуск 43, КНУБА .2023 . с.36-44 [https //doi.org/10.32347/2524-0021.2023.43.36-44](https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.43.36-44)

5. Білик С.І., . Макаренко В.Д., Гоц В.І., Савенко В.І., Владимиров О.В., Шатрова І.А. та ін. Кінетика тріщиноутворення в сталевих конструкціях Монографія-Київ. НУБіП України. 2023. -248с.ISBN 5-8365-1268-82

Literature

1. Makarenko V.D., Savenko V.I., Gots V.I., Ivanchenko G.M. Corrosion resistance under dynamic loading of building structures: monograph. – Nizhyn: M. Gogol National University. 2025. – 120 p. ISBN 5-8365-1268-88

2. Savenko V.I., Nesterenko I.S., Klyueva V.V., Polosenko O.V., Kulikov P.M. On the problems of recognition and implementation of innovative technologies and relations between scientists and state institutions. SWorld Journal Issue #27 Part 1 September 2024 –pp. 3-13 International periodic journal www.sworldjournal.com D.A.Tsenov Academy of Economics Svishtov (Bulgaria) Index Copernicus Google scholar ISSN 2663-5712 DOI:10.30888/2663-5712.2024-27-00-007

3. Makarenko V.D., Gots V.I., Savenko V.I., Vladimirov O.V., Makarenko Yu.V. Experimental studies of crack growth kinetics and load-bearing capacity of pipe steels in underground drainage systems//Strength of Materials and Theory of Structures: Issue No. 110.- 2023, pp. 469-482

4. Gots V, Makarenko V., Voitovich O., Makarenko Yu.,, Savenko V., Vladimirov O., Stogniy O., Azutov V. Investigation of the influence of the corrosive environment on the long-term fatigue of steel sewer structures. Scientific and Technical Journal. Problems of water supply, drainage, and hydraulics. Issue 43, KNUBA. 2023. pp. 36-44. <https://doi.org/10.3347/2524-0021.2023.43.36-44>

5. Bilyk S.I., . Makarenko V.D., Gots V.I., Savenko V.I., Vladimirov O.V., Shatrova I.A. et al. Kinetics of crack formation in steel structures. Monograph. Kyiv. National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. 2023. -248 p. ISBN 5-8365-1268-82



Abstract. The degradation of steels is largely influenced by stresses, the type and condition of the material, the loads characterized by sign, magnitude, and rigidity of the scheme, especially in the area of welded joint connections, stress concentration, cyclic stress, and the reserve and concentration of elastic potential energy. Most welded structures, subjected to the influence of corrosion-active environments, are shell-type constructions (reactors, tanks, cylinders, pipelines, body structures, machines, bridges, railways, etc.) with a characteristic biaxial stressed state. Therefore, the impact of stress factors and load types has been studied with respect to this state in materials with different strength, plasticity, and sensitivity to stress concentration in environments causing corrosion cracking.

To evaluate operational-corrosion strength, comparative tests of welded joints and base metals are conducted in both unstressed and stressed conditions. Testing methods to assess resistance can be classified based on the following criteria: 1) target purpose; 2) type of object tested; 3) type of stressed state; 4) types of experimental environments; 5) resistance indicator depending on the type of corrosion failure.

A review of literature from both domestic and foreign researchers, as well as practical data, reveals that the results in the majority of cases are contradictory and uncertain. Quantitative, substantiated recommendations for practical applications to enhance the corrosion-mechanical resistance of construction structures, pipeline constructions, and various types of equipment used in the oil and gas industry, construction, machine engineering, and other sectors are absent. Consequently, there is a growing demand for the study of causes and consequences of poor protection of these structures, pipes, and welded joints, necessitating additional experimental investigations.

The analysis of studies presented in literature sources indicates that the current focus is on the investigation of issues such as the influence of stress concentrators in welded joints on the development of corrosion cracks, which lead to the failure of special steels manufactured through improved steel modification techniques, particularly with elements like vanadium, niobium, and rare earth metals (REMs). Moreover, the results presented in domestic and foreign journals are contradictory, as they were conducted on different steels using various methods and evaluation criteria, which complicate the comparison of experimental results and do not provide a definitive assessment regarding the resistance of steels under loading, stress, defects in structure, and other factors. This necessitates the need for systematic and comprehensive experimental research, which could assist in the development of methods to extend the service life of metallic structures, pipelines, shells, and so on. Furthermore, there is an evident lack of state support for scientists and research programs, which hinders the development of fundamental science.

Keywords: special steels, stress concentrators, construction stability, shell structures, corrosion-active environments, corrosion cracking.