

ДОСЛІДЖЕННЯ КОРОЗІЙНО-МЕХАНІЧНОЇ СТІЙКОСТІ АРМАТУРНИХ СТАЛЕЙ, ПРИЗНАЧЕНИХ ДЛЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ В ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУДАХ

Володимир ГОЦ¹, Валерій МАКАРЕНКО², Оксана БЕРДНИК³

^{1,2,3}Київський національний університет будівництва і архітектури,
31, просп. Повітрофлотський, Київ, Україна, 03037

¹gots.vi@knuba.edu.ua, <http://orcid.org/0000-0001-7702-1609>

²green555@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-6668-3957>

³kseniarezniak87@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-5321-3518>

Анотація. Згідно аналітичного огляду можна сказати, що при тривалому терміні експлуатації залізобетонних конструкцій гідротехнічних споруд їх окремі елементи наприклад арматурні стрижні руйнуються внаслідок недостатньої втомно-корозійної міцності металу арматури. Вони виникають здебільшого під дією основних змінних навантажень – згину, коливань залізобетонних плит, механіко-ерозійних дій середовища.

Основними причинами руйнування арматури є її розрив та втомлюваність внаслідок багаторазової дії силових факторів. Особливо інтенсивно руйнується поверхнева зона арматури в з'єднанні з бетоном унаслідок слабкої міцності зчеплення. Однією з причин руйнування з'єднань арматури з бетоном може бути також застосування низько міцних арматурних сталей.

Підвищення корозійно-механічної надійності залізобетонних конструкцій гідротехнічних споруд можливо за рахунок використання: для виготовлення арматурних стрижнів які є основною силовою структурою залізобетону економічно модифікованих легованих сталей, які проходять складну термічну обробку і які характеризуються високими корозійно-втомними властивостями при роботі в агресивних середовищах при циклічних (знакозмінних) навантаженнях.

Досліджена стійкість проти СКРН, ВІР і корозійно-механічної втомності арматурних сталей призначених для будівельної промисловості. Встановлено, що дослідні сталі, економічно модифікована РЗЕ, міддю нікелем особливо



Володимир ГОЦ

професор кафедри технології будівельних конструкцій і виробів,
д.т.н., професор



Валерій МАКАРЕНКО

професор кафедри технології будівельних конструкцій і виробів
д.т.н., професор



Оксана БЕРДНИК

доцент кафедри технології будівельних конструкцій і виробів
к.т.н., доцент

хромом ніобієм і ванадієм задовольняють вимогам Міжнародного стандарту NACE MR 0175-96 по хімічному складу і механічним властивостям, а сталі марок 10ХСНДА і 20Ф не мають достатньо високого спротиву СКРН (граничні напруження $< 0.8 \cdot \sigma_{0.2}^{\min}$) і корозійно-втомному руйнуванню, причому сталі марок 20Ф і 06Г2Б показали низький спротив ВІР (CLR > 6% і CTR > 3%).

Отже, слід проводити повний (1005-вий) вхідний контроль корозійно-механічної стійкості усіх матеріалів, які залучені до виготовлення залізобетонних конструкцій гідротехнічного

призначення для експлуатації в сірководеньвмісних середовищах.

Ключові слова. Корозія руйнування; наводнення; тріщиностійкість; витривалість; втомлена міцність.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Бетонні і залізобетонні конструкції гідротехнічних споруд в різних кліматичних умовах суттєво піддаються агресивним впливам. Технічне обстеження конструкцій в районах з різним кліматом, аналіз їх стану дозволяє виявити основні негативні впливи середовища. Результати таких обстежень можуть слугувати основою для розробки корозійностійких бетонів і конструкцій з жарким кліматом і морозостійких бетонів.

Досвід технічного обстеження, лабораторні випробування бетонів показують, що наявні розробки дозволяють створювати довговічні гідротехнічні споруди для самих несприятливих природних умов експлуатації, для різних природньо-кліматичних умов.

Бетонні і залізобетонні конструкції гідротехнічних споруд піддаються в процесі експлуатації різним агресивним впливам:

- вилуговуючій дії прісної води, в тому числі в фільтруючих тріщинах, останні сприяють швидкій корозії арматури;
- дії хімічних солей, які містяться в морській воді (сульфати, бікарбонати, магнезіальні солі);
- депасивуючій дії хлоридів на сталеву арматуру;
- карбонізація бетону вуглекислим газом повітря;
- заморожуванню і відтаванню, утворення льоду на поверхні конструкції, що перешкоджає випаровування води, що в свою чергу збільшує вміст в зоні контакту з залізобетонними конструкціями.

Небезпека пошкодження залізобетонних конструкцій виникає при наявності наскрізних тріщин і напору води. Розчинення цементного каменю спричиняє поступове розширення тріщин і збільшення потоку води. Вода виносить розчинений гідрооксид кальцію, який при виході на поверхню в контакт

з повітрям карбонізується і утворює напливи нерозчиненого у водні карбонату кальцію. Маса таких напливів може досягати сотень кілограмів. В розширеній, внаслідок вилуговування тріщини, на поверхні сталеві арматури знижується рН середовища, утворюється гальванічна пара з анодом на оголеній в тріщині арматурної сталі.

Корозія арматури значно значно прискорюється, коли у воді присутні солі. Відомі розриви арматури в фільтруючих тріщинах після декількох років експлуатації конструкцій.

В надземних конструкціях, наприклад в приміщеннях будинків гідротехнічних споруд терміном експлуатації 70 років, встановлена карбонізація бетону, яка виходила на поверхню арматури. В значній мірі причина глибокої карбонізації полягає в тому, що в 1935-1950-х роках процес карбонізації бетону ще не був достатньо вивченим і вимоги до бетону по заниженій проникності не були тоді нормовані.

Ціллю даного дослідження є дослідження корозійно-механічної стійкості арматурних сталей, які можуть експлуатуватися в гідротехнічних спорудах з підвищеними експлуатаційними характеристиками.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Відомо [1-3], що спротив металу втомленню характеризується межею витривалості (втомленості), тобто це найбільше напруження, яке витримує метал без руйнування при любій кількості циклів. Межу витривалості найбільш часто визначають при випробуваннях зі знакозмінному симетричному циклі ($R=-1$), а тому границю витривалості позначають через σ_{-1} .

Як правило, границю витривалості обмежують 10^7 циклами (цю кількість циклів називають базою випробувань). Таким чином, можна відмітити, що границя витривалості – це максимальне напруження циклу, яке витримує матеріал без руйнування при базовому числі циклів (для чорних металів ця база складає 10^7 циклів). Тоді по кривих втомленості можна знаходити такий важливий показник, як довговічність при втомленості,

Під якою приймають число циклів навантаження, яке витримує сталь при руйнуванні при певному напруженні [3,4].

Із літератури [5] відомо, що границя витривалості в металі добре корелює з механічними властивостями металів. Так, величина σ_{-1} складає в середньому $(0.4-0.6)\sigma_B$ – для вуглецевих і легованих сталей; $(0.3-0.5)\sigma_B$ – для бронзи і латуні. Можна цю характеристику аналогічним чином порівняти з твердістю по Брінелю: $\sigma_{-1} = (0.128-0.156)HB$ – для вуглецевих сталей $(0.168-0.222)HB$ – для легованих сталей; $\sigma_{-1} = 0.19HB$ – для алюмінієвих сплавів.

Відомо із сучасної механіки руйнувань [5,6], що зі збільшенням числа циклів при любых напруженнях вище границі витривалості в металі послідовно протікають такі процеси: 1)пластична деформація; 2)зародження тріщин, осередками яких слугують неметалеві включення (НВ); 3)поступовий розвиток деяких з них з переважним розповсюдженням головної тріщини; 4)швидке кінцеве руйнування.

Процес втомленості починається з пластичної деформації поверхневих шарів металу арматури. Причому, переміщення дислокацій в умовах повторно-змінних навантажень спостерігається при навантаженні нижче границі пружності металу. Швидкість локальної пластичної деформації при циклічному деформуванні на декілька порядків перевищує швидкість деформування при статичному навантаженні. Ковзання дислокацій починається в зернах із сприятливою орієнтацією поблизу концентраторів напружень. Зі збільшенням числа циклів в поверхневих шарах зростає щільність дислокацій і кількість вакансій. При досягненні базової кількості циклів N_R формується поверхневий зміцнений шар металу з великою кількістю зародкових тріщин, розмір яких не досягає критичного значення. Підвищення числа циклів не може спричинити подальший розвиток руйнування в такому шарі. Тільки, коли напруження перевищують границю витривалості тріщини досягають критичної довжини [6,7], після чого починається процес їх зливу в магістральну тріщину з розповсюдженням останньої.

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

В якості модельних середовищ використовували: середовище NACE (5% розчин NaCl, який містив 0.5% CH_3COOH і насичений H_2S ; $t=22\pm 2^\circ C$; $pH=3.8-4.0$); Об'єктами досліджень були наступні сталі: 16Г2АФ; 20Ф; 15ХСНДА; 10ХСНДА; 09Г2ФБ; 06Г2Б і 08ХМЧА.

Швидкість корозії визначали із застосуванням гравіметричного методу: термін випробування – 480 год. Зразки, вирізані безпосередньо з арматурних стрижнів діаметру 32мм, випробували також на схильність до воднем ініційованого руйнування (ВІР) згідно Міжнародного стандарту NACE TM-02-90, оскільки такий тест обов'язковий при виборі матеріалу для виготовлення відповідальних конструкцій гідротехнічного призначення, контактуючого із середовищами, які містять сірководень [8].

Досліджували ВІР прямокутних зразків довжиною 80 мм (уздовж прокатки), шириною $W=12$ мм (поперек прокатки) й товщиною T (визначається діаметром арматури з урахуванням припуску на механічну обробку до металевого блиску), які вирізали безпосередньо з арматурних стрижнів після їх прокатки. Тест передбачає 96-годинну витримку напружених зразків в синтетичному розчині NACE (5%-вий розчин $NaCl+0.5\% CH_3COOH$, безперервне насичення H_2S із швидкістю барботажу 10 мл/хв.; $pH=3-4$), причому мінімальний об'єм розчину складав 4 мл на 1 см^2 поверхні зразку [9]. Надалі зразки розрізали, а поверхню зрізу полірували і протравлювали в середовищі хімічних реагентів. Всі виявлені при збільшенні $\times 100$ тріщини вимірювали, крім тих, які знаходилися на відстані до 1 мм від поверхні зразку.

На базі результатів вимірювань, розраховували коефіцієнти чутливості сталі до індукованому воднем руйнуванню за наступними формулами: коефіцієнт довжини тріщино утворення $CLR=(\Sigma a/W)\cdot 100,\%$; коефіцієнт ширини тріщино утворення $STR=(\Sigma b/T)\cdot 100,\%$, де Σa і Σb – сума відповідно поздовжніх і поперечних розмірів ділянок тріщино утворення, мм [10].

Згідно з Міжнародною Специфікацією, встановлені наступні вимоги до водневої стійкості трубних сталей: для VIP – коефіцієнти довжини тріщини $CLR \leq 6\%$ і товщини тріщини $CTR \leq 3\%$.

Схильність арматурних сталей до сульфідного корозійного руйнування під напруженням (СКРН) визначали згідно стандарту NACE TM 01-77(90) – метод А (на циліндричних зразках діаметром 6.4 мм), що дозволяла товщина перетину арматури [11]. Випробували зразки на установці моделі «Інстрон» (Великобританія) під навантаженням (в кожному досліді використовували по 5 зразків). При цьому визначали граничне напруження σ_{SSC} , для того щоб порівняти якість сталей різних марок і заводів-виробників арматури. Умови випробувань по

цьому стандарту наступні: тривалість – 720 год в 5%-вому розчині NaCl, який містить 0.5% CH_3COOH і насиченому H_2S ; $\text{pH}=3$; $t=22\pm 2^\circ\text{C}$ [12]. Параметр σ_{SSC} визначали із залежності $\sigma_i - \lg t$ (σ_i – початкове навантаження; t – час до руйнування, год), при якій зразки не руйнуються на прийнятій часовій базі випробувань.

Графік залежності $\sigma_i - \lg t$ будували по мінімальним значенням часу до руйнування під кожним навантаженням, оскільки використання середніх значень t неприпустимо з огляду необхідності гарантованої працездатності залізобетонних конструкцій в технологічних середовищах із сірководнем. Форма і розміри зразків для втомних (багатоциклових) випробувань наведені на рис. 1

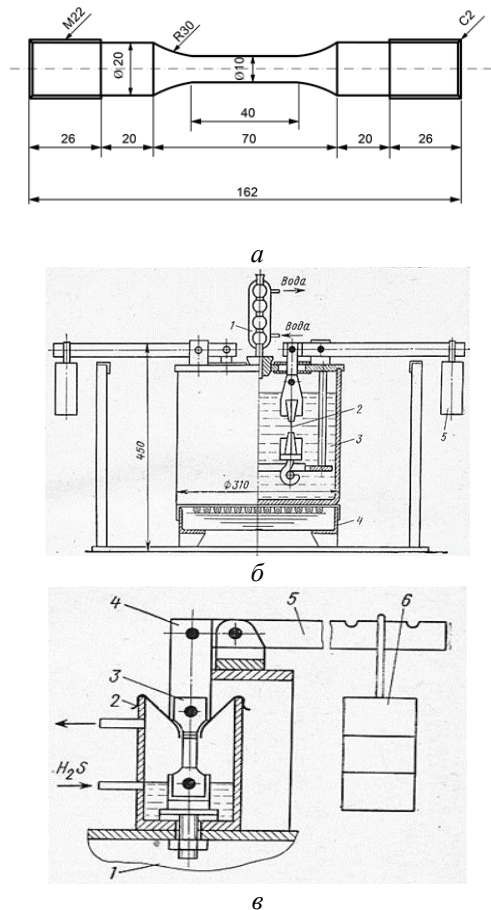


Рис.1. Вплив технологічних факторів.

a – Зразок для випробувань на втомлену міцність (втомленість)

б – Принципова схема установки для одновісних розтягуючих зусиль:

1 – холодильник, 2 – зразок, 3 – ємність, 4 – піч, 5 – вантаж

в – Комірка для випробувань в середовищі NACE (з сірководнем):

1 – основа, 2 – комірка, 3 – зразок, 4 – сердечник, 5 – ричаг, 6 – вантаж

Fig.1. Influence of technological factors.

a – A sample for tests on fatigue strength (fatigue)

b – Schematic diagram of the installation for uniaxial tensile forces:

1 – refrigerator, 2 – sample, 3 – container, 4 – furnace, 5 – cargo

c – Cell for tests in the NACE environment (with heart water):

1 – base, 2 – cell, 3 – sample, 4 – core, 5 – lever, 6 – load

Тривалу міцність (випробування на повітрі) та корозійно-втомні випробування проводили на установці гирьового типу УСМР-6 під навантаженням (в кожному досліді використовували по 5 зразків). За основу була прийнята база $1 \cdot 10^6$ циклів (див. рис.1б, в).

Випробування на сульфідне розтріскування проводили по методиці згідно стандарту НАСЕТМ-01-90 [15]. В якості модельного середовища використовували розчин НАСЕ. Базовий термін випробувань – 720 год. Всі зразки випробували при напруженні рівному 0.8 границі текучості металу арматури, який визначали при розриві трьох зразків на повітрі. Випробування зразків з кільцевою проточкою посередині проводили методом неперервної деформації до руйнування (з малою швидкістю $\epsilon = 2 \cdot 10^{-6} \text{ c}^{-1}$) в корозійному середовищі.

Результати вимірів швидкості корозії зразків металу арматурних сталей в модельному середовищі НАСЕ представлені на рис.4. Аналіз даних рис.2 свідчить, що найбільш високою корозійною стійкістю в цьому середовищі характеризуються економічно модифіковані ванадієм, ніобієм, хромом, нікелем і церієм сталі, зокрема 16Г2АФ, 09Г2ФБ, 15ХСНДА і 08ХМЧА, в меншій степені протистоять корозії сталі марок 06Г2Б, 10ХСНДА і 20Ф.

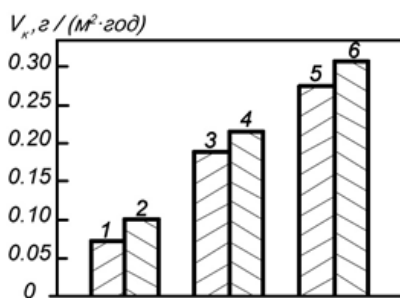


Рис.2. Діаграма швидкості корозії зразків арматурних сталей в модельному середовищі НАСЕ. Нумерація зразків і марок сталей:

1–16Г2АФ, 2–09Г2ФБ, 3–15ХСНДА, 4–08ХМЧА, 5–06Г2Б, 6–10ХСНДА, 7–20Ф

Fig.2. Corrosion rate diagram of reinforcing steel samples in a model environment. Numbering of steel samples and grades:

1–16Г2АФ, 2–09Г2ФБ, 3–15ХСНДА, 4–08ХМЧА, 5–06Г2Б, 6–10ХСНДА, 7–20Ф

Дослідження СКРН. Схильність арматурних сталей до СКРН графічно відображена на рис.3. Видно, що найбільшим спротивом СКРН характеризуються сталі наступних марок 16Г2АФ, 09Г2ФБ, 15ХСНДА, 10ХСНДА. Декілька нижчим спротивом володіють сталі 20Ф, 08ХМЧА і 06Г2Б. Видно, що як в протистоянні процесу корозії, так і у випадку спротиву корозійним руйнуванням під напруженням (СКРН) спостерігається повна аналогія, тобто найбільшим спротивом СКРН характеризуються сталі, економічно модифіковані ванадієм, ніобієм, церієм та іншими корисними елементами [14,15].

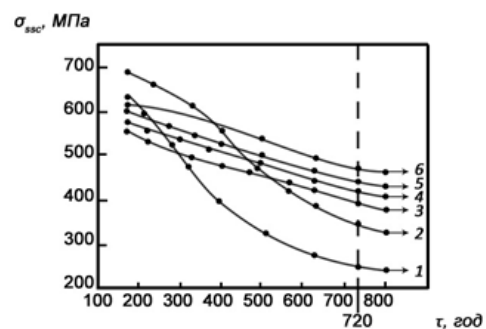


Рис.3. Схильність до сульфідного корозійного руйнування під напруженням арматурних сталей при випробуваннях в модельних середовищах. Нумерація відповідає позначенню на рис. 1

Fig.3. Susceptibility to sulphide corrosion under stress of reinforcing steels during tests in model environments. The numbering corresponds to the designation in fig 1

Однак, слід відзначити, що абсолютні значення σ_{tssc} ще не слід використовувати при проектуванні залізобетонних конструкцій відповідального призначення наприклад для гідротехнічних підземних споруд з причини відсутності надійних методів визначення та прогнозування їх втомної (тривалої) міцності, оскільки вони можуть змінюватися під дією багатьох чинників (концентрації сірководню і вуглецевого газу та їх парціальних тисків, рН середовища, температури середовища, технологічних зупинок, стану конструкцій і ін.) [15]. Тому в розрахунках на тривалу міцність і несучу здатність арматурних сталей залізобетонних конструкцій, визначенні діаметру арматури вихідним параметром може бути мінімально

допустиме значення умовної межі текучості сталі $\sigma_{0.2}^{\min}$, а придатність конструкційних матеріалів оцінюють за допомогою граничних напружень, які виражає коефіцієнт впливу середовища [17]: $k_{tssc} = \sigma_{tssc} / \sigma_{0.2}^{\min}$ (рис. 4).

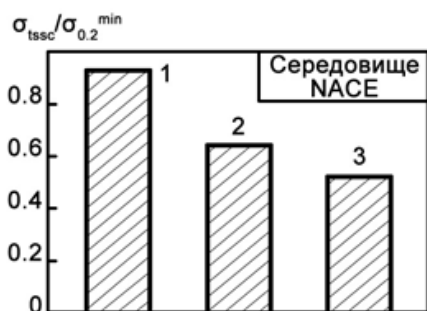


Рис.4. Порогові значення спротиву сульфідному корозійному руйнуванню під напруженням арматурних сталей залізобетонних конструкцій тривалого терміну експлуатації в середовищі NACE: 1 – сталь 16 Г2АФ; 2 – 09 Г2ФБ; 3 – сталь 20Ф. Відхилення значень σ_{tssc} не перевищує 10%

Fig.4. Threshold values of resistance to sulphide corrosion under stress of reinforcing steels of reinforced concrete structures with a long service life in the environment NACE: 1 – steel 16 G2AF; 2 – 09 G2FB; 3 – steel 20F. Deviation of σ_{tssc} values does not exceed 10%

Прийнято вважати, що сталь придатна для виготовлення арматури та експлуатації в технологічних середовищах з високим вмістом корозійно-агресивних компонентів, в тому числі сірководень (до 20 мол. %), коли $k_{tssc} \geq 0.8$.

Із вищенаведених експериментальних результатів видно, що найбільш високою корозійною стійкістю проти СКРН характеризується сталь марки 16Г2АФ і 09Г2ФБ, а сталь марки 20Ф має низькі значення коефіцієнта $k_{tssc} = 0.45 - 0.60$ (див. рис.2). Таким чином, працездатність сталей для арматурних сталей будівельного призначення, яка оцінюється за параметрами k_{tssc} і σ_{tssc} , відрізняється.

Слід звернути увагу, що результати дослідження спротиву сталей СКРН добре ко-

релюють з даними визначення гравіметричним методом швидкості корозії як в розчині NACE, так і в розчині NaCl (див. рис.2).

Таким чином, можна зробити узагальнення про те, що економно модифіковані сталі 16Г2АФ і 09Г2ФБ, які містять низькі концентрації шкідливих домішок сірки, фосфору та водню, характеризується високою стійкістю проти рівномірної корозії, в т. ч. і проти СКРН, а тому можуть бути рекомендована для використання у виробництві арматури для залізобетонних конструкцій гідротехнічних споруд.

Дослідження ВІР. Результати досліджень ВІР арматурної сталі (без прикладення навантаження) показали, що в розчині NACE здійснюється водневе розтріскування та поверхневе здуття деяких сталей марки 06ГГБ і 20Ф. Розрахункові значення показників водневого розтріскування ВІР для цих сталей складають: CLR=3.2–4.8% ; CTR=6.9–10.8%. Встановлено, що сталі 16Г2АФ, 09Г2ФБ, 08ХМЧА, 15ХСНДА–відповідають вимогам Технічних умов [11-15].

Дослідження корозійної втомності (тривалості міцності). В процесі експериментальних досліджень встановлено наступне (рис. 5):

1)Середовище NACE, яке містить сірководень, більше ніж в 1.75 раз, знижує межу втомності зразків діаметром 5 мм із сталі марки 09Г2ФБ (з 700 до 400 МПа).

2)Сірководеньвмісне середовище NACE майже в 5 раз (з 490 до 200 МПа) знижує межу втомності сталі 10ХСНДА.

3)Найбільші значення тривалості міцності показали експериментальні сталі в середовищі NACE. Економне модифікування сталі РЗМ (сталь 08ХМЧА) дозволило підвищити корозійно-втомну міцність навіть при випробуванні в агресивному середовищі NACE більш, ніж в 2 рази порівняно із звичайною сталлю марки 10ХСНДА (див. рис.5). Так, умовна межа корозійної втомності сталей 15ХСНДА і 06Г2Б в сірководеньвмісному середовищі при 1 млн. циклів (база багато циклових випробувань) - (криві 2 і 4 на рис.5) підвищилася з 190 до 280-290 МПа. Із наведених вище результатів експериментів можна узагальнити, що позитивний ефект від легування модифікуючими

Домішками спостерігається стабільно при використанні їх в низьколегованих сталях в обмеженій кількості вказаній вище по тексту. Подальше збільшення їх спричиняє застосування металу крупними частинками силікатів чи оксидів та окисульфідів церію ніобію і ванадію, не впливаючи при цьому на загальну кількість неметалевих включень.

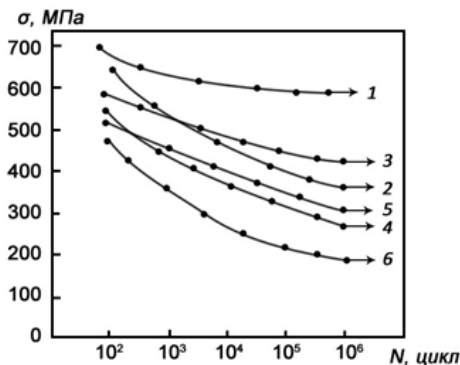


Рис.5. Криві корозійної втоми зразків арматурних сталей в розчині NACE: позначення марки сталей див рис. 1.

Fig.5. Corrosion fatigue curves of samples of reinforcing steels in NACE solution: designation of the brand of steels, see fig. 1

У вітчизняних і закордонних дослідженнях ряду авторів відзначено, що причинами зниження стійкості до СКРН і ВІР окремих вуглецевих і низьколегованих сталей може бути наявність в них силікатів, а також мікроліквація окремих легуючих елементів чи домішок, або порушення термомеханічних режимів прокатки арматурних стрижнів [14].

Отже, результати лабораторно-експериментальних досліджень показали, що економічно модифіковані сталі характеризуються високою корозійно-втомною міцністю і можуть використовуватися в конструкціях залізобетону, контактуючих з агресивними середовищами гідротехнічних систем. Отримані результати експериментальних досліджень можуть бути корисними для конструкторів при розробці апроєктів з використання залізобетонних виробів в гідротехнічних спорудах, наприклад, підземних каналізаційних систем, тобто потрібна їх ретельна перевірка в умовах промислового будівництва.

Результати випробувань корозійного руйнування зразків арматурних сталей в середовищі NACE наведені на рис.6. Аналіз даних наведених на рис.6 дає можливість відмітити, що найбільшою стійкістю проти сульфідно-корозійного руйнування володіють арматурні сталі марок 16Г2АФ, 09Г2ФБ, 15ХСНДА. Остальні марки 08ХМЧА, 06Г2Б, 10ХСНДА і 20Ф чинять меншій спротив корозійному руйнуванню.

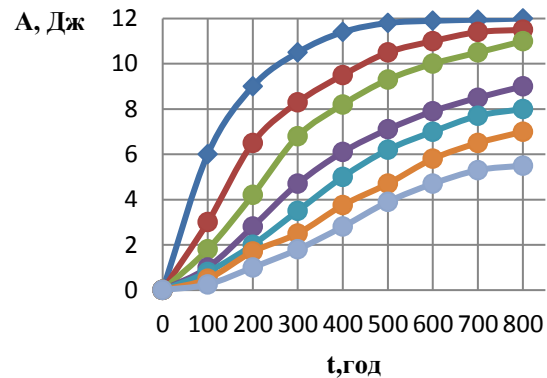


Рис.6. Робота корозійного руйнування зразків арматури в середовищі NACE. Позначення арматурних сталей:

1–16Г2АФ, 2–09Г2ФБ, 3–15ХСНДА, 4 – 08ХМЧА, 5–06Г2Б, 6–10ХСНДА, 7 – 20Ф

Fig.6. The work of corrosion destruction of reinforcement samples in the NACE environment. Designation of reinforcing steels:

1–16Г2АФ, 2–09Г2ФБ, 3–15ХСНДА, 4 – 08ХМЧА, 5–06Г2Б, 6–10ХСНДА, 7 – 20Ф

ВИСНОВКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Аналітичний огляд показав, що при тривалому терміні експлуатації залізобетонних конструкцій гідротехнічних споруд їх окремі елементи наприклад арматурні стрижні руйнуються внаслідок недостатньої втомно-корозійної міцності металу арматури. Вони виникають здебільшого під дією основних змінних навантажень – згину, коливань залізобетонних плит, механіко-ерозійних дій середовища. Основними причинами руйнування арматури є її розрив та знос унаслідок багаторазової дії силових факторів. Особливо інтенсивно руйнується поверхнева

зона арматури в з'єднанні з бетоном унаслідок слабкої міцності зчеплення. Однією з причин руйнування з'єднань арматури з бетоном може бути також застосування низько міцних арматурних сталей.

Підвищення корозійно-механічної надійності залізобетонних конструкцій гідротехнічних споруд можливо за рахунок використання: для виготовлення арматурних стрижнів які є основною силовою структурою залізобетону економно модифікованих легуваних сталей, які проходять складну термічну обробку і які характеризуються високими корозійно-втомними властивостями при роботі в агресивних середовищах при циклічних (знакозмінних) навантаженнях;

Досліджена стійкість проти СКРН, ВІР і корозійно-механічної втомності арматурних сталей призначених для будівельної промисловості. Встановлено, що дослідні сталі, економно модифікована РЗЕ, міддю нікелем особливо хромом ніобієм і ванадієм задовольняють вимогам Міжнародного стандарту NACE MR 0175-96 по хімічному складу і механічним властивостям, а сталі марок 10ХСНДА і 20Ф не мають достатньо високого спротиву СКРН (граничні напруження $< 0.8 \cdot \sigma_{0.2}^{\text{min}}$) і корозійно-втомному руйнуванню, причому сталі марок 20Ф і 06Г2Б показали низький спротив ВІР (CLR $> 6\%$ і СТР $> 3\%$). Отже, слід проводити повний (100%-вий) вхідний контроль корозійно-механічної стійкості усіх матеріалів які залучені до виготовлення залізобетонних конструкцій гідротехнічного призначення для експлуатації в сірководеньвмісних середовищах.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Makarenko, V. D., & Morgun, I. D.** (1991). Special features of the effect of barium on the mechanical properties of metal deposited in welding with calcium fluoride electrodes. *Welding International*, 5(9), 726-728.
2. **Gots V.I., Lastivka O.V., Berdnyk O.Yu., Tomin O.O., Shilyuk P.S.** Corrosion resistance of polyester powder coatings using fillers of various chemical nature. – *Key Engineering Materials*. – Vol. 864.115-121 (Scopus) <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.864.115>
3. **Berdnyk O Yu, Lastivka O V, Maystrenko A A, Amelina N O.** Processes of structure formation and neoformation of basalt fiber in an alkaline environment. – *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – *Innovative Technology in Architecture and Design (ITAD 020)*. – Vol. 907. – 012036. (Scopus) <https://www.scintific.net/KEM.864.115>
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/907/1/012036/pdf>
4. **Pokhodnya, I. K., Ponomarev, V. E., Milichenko, S. S., Skorina, N. V., Makarenko, V. D., Marchenko, A. E., & Gorpenyuk, V. N.** (1987). Effects of type of binder and its composition on the welding and properties of electrodes with basic coatings. *Welding International*, 1(2), p.116-118.
5. **Jun Z.** Application and research status of concrete canvas and its application prospect in emergency engineering. /Wei X., Xingzhong W., Lihai S., Jiang W. // *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. 2020. 15 p.
6. **Makarenko V.** Hydrate Formations Modeling for the Oil and Gas Facilities Reconstruction. / Makarenko V., Vynnykov Y., Liashenko A., Petrash O // *Proceedings of the 2nd International Conference on Building Innovations. ICBI 2019. Lecture Hydrate Formations Modeling for the Oil and Gas Facilities Reconstruction Notes in Civil Engineering*, vol 73. Springer, Cham. – p. 651-658.
7. **Xu J.** Synthesis and properties of cotton fabric functionalized by dimethyl phosphite and perfluorohexyl group grafted graphene oxide. /Zhang J., Xu J., Zhang Z., Zhang H. // *Pigment and Resin Technology*. 2020. Vol. 48 (6). pp. 515-522
8. **Shi F.** Study on UV-protection and hydrophobic properties of cotton fabric functionalized by graphene oxide and silane coupling agent. /Xu J., Zhang Z. // *Pigment and Resin Technology*. 2019. Vol. 48 (3). pp. 237-242.
9. **Choi K.** Fire protection behavior of layer-by-layer assembled starch-clay multilayers on cotton fabric. /Seo S., Kwon H., Kim D., Park Y.T. // *Journal of Materials Science*. 2018. Vol. 53 (16). pp. 11433-11443.
10. **Dolez P.I.** A quantitative method to compare the effect of thermal aging on the mechanical performance of fire protective fabrics. /Tomer N.S., Malajati Y. // *Journal of Applied Polymer Science*. 2019. Vol. 136 (6). 47045. 7 p.
11. **Zhou S.** Flame Retardancy and Mechanism of Cotton Fabric Finished by Phosphorus Containing SiO₂ Hybrid Sol. /Huangfu W. .

- You F., Li D., Fan D. //9th International Conference on Fire Science and Fire Protection Engineering. 2019. 9055847. 7 p.
12. **Kundu C.K.** Sol-gel coatings from DOPO-alkoxysilanes: Efficacy in fire protection of polyamide 66 textiles. /Song L., Hu Y. //European Polymer Journal. 2020. Vol. 125. 109483.
 13. **Malucelli G.** Sol-Gel and layer-by-layer coatings for flame-retardant cotton fabrics: Recent advances. //Coatings. 2020. Vol. 10 (4). pp. 333.
 14. **Vachnina T.N.** Improvement of fire protection of wood board and textile materials for premises with a massive stay of people. /Susoeva I.V., Titunin A.A. //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 962 (2). 022008.
 15. **Dietzel Y.** Development of a environmentally friendly, halogen-free flame-retardant coating on the basis of high-performance submicron metal hydroxides. //Gummi, Fasern, Kunststoffe. 2015. Vol. 68 (7). pp. 490-496.
5. **Jun Z.** Application and research status of concrete canvas and its application prospect in emergency engineering. /Wei X., Xingzhong W., Lihai S., Jiang W. //Journal of Engineered Fibers and Fabrics. 2020. 15 p.
 6. **Makarenko V.** Hydrate Formations Modeling for the Oil and Gas Facilities Reconstruction. /Makarenko V., Vynnykov Y., Liashenko A., Petrash O //Proceedings of the 2nd International Conference on Building Innovations. ICBI 2019. Lecture Hydrate Formations Modeling for the Oil and Gas Facilities Reconstruction Notes in Civil Engineering, vol 73. Springer, Cham. – p. 651-658.
 7. **Xu J.** Synthesis and properties of cotton fabric functionalized by dimethyl phosphite and perfluorohexyl group grafted graphene oxide. /Zhang J., Xu J., Zhang Z., Zhang H. //Pigment and Resin Technology. 2020. Vol. 48 (6). pp. 515-522.
 8. **Shi F.** Study on UV-protection and hydrophobic properties of cotton fabric functionalized by graphene oxide and silane coupling agent. /Xu J., Zhang Z. //Pigment and Resin Technology. 2019. Vol. 48 (3). pp. 237-242.
 9. **Choi K.** Fire protection behavior of layer-by-layer assembled starch-clay multilayers on cotton fabric. /Seo S., Kwon H., Kim D., Park Y.T. //Journal of Materials Science. 2018. Vol. 53 (16). pp. 11433-11443.
 10. **Dolez P.I.** A quantitative method to compare the effect of thermal aging on the mechanical performance of fire protective fabrics. /Tomer N.S., Malajati Y. //Journal of Applied Polymer Science. 2019. Vol. 136 (6). 47045. 7 p.
 11. **Zhou S.** Flame Retardancy and Mechanism of Cotton Fabric Finished by Phosphorus Containing SiO₂ Hybrid Sol. /Huangfu W., You F., Li D., Fan D. //9th International Conference on Fire Science and Fire Protection Engineering. 2019. 9055847. 7 p.
 12. **Kundu C.K.** Sol-gel coatings from DOPO-alkoxysilanes: Efficacy in fire protection of polyamide 66 textiles. /Song L., Hu Y. //European Polymer Journal. 2020. Vol. 125. 109483.
 13. **Malucelli G.** Sol-Gel and layer-by-layer coatings for flame-retardant cotton fabrics: Recent advances. //Coatings. 2020. Vol. 10 (4). pp. 333.
 14. **Vachnina T.N.** Improvement of fire protection of wood board and textile materials for premises with a massive stay of people. /Susoeva I.V., Titunin A.A. //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering

REFERENCES

1. **Makarenko, V. D., & Morgun, I. D.** (1991). Special features of the effect of barium on the mechanical properties of metal deposited in welding with calcium fluoride electrodes. *Welding International*, 5(9), 726-728.
2. **Gots V.I., Lastivka O.V., Berdnyk O.Yu., Tomin O.O., Shilyuk P.S.** Corrosion resistance of polyester powder coatings using fillers of various chemical nature. – *Key Engineering Materials.* – Vol.864.115-121 (Scopus)
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.864.115>
<https://www.scintific.net/KEM.864.115>
3. **Berdnyk O Yu, Lastivka O V, Maystrenko A A, Amelina N O.** Processes of structure formation and neof ormation of basalt fiber in an alkaline environment. – *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.* – *Innovative Technology in Architecture and Design (ITAD 020).* – Vol. 907. – 012036. (Scopus)
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/907/1/012036/pdf>
4. **Pokhodnya, I. K., Ponomarev, V. E., Milichenko, S. S., Skorina, N. V., Makarenko, V. D., Marchenko, A. E., & Gorpenyuk, V. N.** (1987). Effects of type of binder and its composition on the welding and properties of electrodes with basic coatings. *Welding International*, 1(2), p.116-118.

. 2020. Vol. 962 (2). 022008.

15. **Dietzel Y.** Development of a environmentally friendly, halogen-free flame-retardant coating on the basis of high-performance submicron metal hydroxides. // *Gummi, Fasern, Kunststoffe*. 2015. Vol. 68 (7). pp. 490-496.

STUDY OF CORROSION-MECHANICAL RESISTANCE OF REINFORCING STEEL INTENDED FOR OPERATION IN HYDROTECHNICAL STRUCTURES

*Volodymyr GOTS,
Valeriy MAKARENKO,
Oksana BERDNYK*

Summary. Analytical review showed that during the long term of operation of reinforced concrete structures of hydraulic structures, their individual elements, such as reinforcing rods, are destroyed due to insufficient fatigue and corrosion resistance of the metal of the reinforcement. They arise mostly under the action of the main variable loads - bending, vibrations of reinforced concrete slabs, mechanical and erosive actions of the environment. The main reasons for the destruction of reinforcement are its rupture and wear as a result of repeated action of force factors. The surface zone of the reinforcement in the connection with concrete is especially intensively destroyed due to weak bond strength. One of the reasons for the destruction of reinforcement joints with concrete can also be the use of low-strength reinforcing steels. An increase

in the corrosion-mechanical reliability of reinforced concrete structures of hydrotechnical structures is possible due to the use: for the manufacture of reinforcing rods, which are the main strength structure of reinforced concrete, economically modified alloy steels that undergo complex heat treatment and are characterized by high corrosion-fatigue properties when working in aggressive environments with cyclic (sign-changing) loads.

The studied resistance against SCRN, VIR and corrosion-mechanical fatigue of reinforcing steels intended for the construction industry. It was established that experimental steels economically modified with REE, copper, nickel, especially chromium, niobium, and vanadium meet the requirements of the International Standard NACE MR 0175-96 in terms of chemical composition and mechanical properties and steels of grades 0XCHДА and 20Φ do not have a sufficiently high resistance of the SCRN ($\text{limit stress} < 0.8 \cdot \sigma_{0.2}^{\text{min}}$) and corrosion-fatigue failure, and steel grades 20F and 06G2B showed low VIR resistance (CLR > 6% and CTR > 3%). Therefore, a full (100%) input control of the corrosion-mechanical resistance of all materials involved in the production of reinforced concrete structures for hydrotechnical purposes for operation in hydrogen sulfide-containing environments should be carried out.

Keywords. Corrosion breakdown; flooding; crack resistance; endurance; fatigue strength

Стаття надійшла до редакції 06.10.2023