

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ МІЖ МЕЖЕЮ МІЦНОСТІ І ТРИВАЛОЮ ВТОМЛЕНІСТЮ СТАЛЕВОЇ АРМАТУРИ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ ТРИВАЛОГО ТЕРМІНУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ В АГРЕСИВНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

Оксана БЕРДНИК¹, Валерій МАКАРЕНКО¹, Наталія АМЕЛІНА¹,

¹Київський національний університет будівництва і архітектури,
31, просп. Повітряних Сил, Київ, Україна, 03037

¹kseniareznik87@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-5321-3518>

¹makarenko_vd@knuba.edu.ua, <http://orcid.org/0000-0001-6668-3957>

¹navd1@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0002-3076-8120>

Анотація. Відомо, що процес втоми починається з пластичної деформації поверхневих шарів металу арматури. Причому, переміщення дислокацій в умовах повторно-змінних навантажень спостерігається при навантаженнях 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, після чого починається процес їх зливу в магістральну тріщину з розповсюдженням останньої.

Результати експериментальних досліджень свідчать про сильний вплив дифузійного водню на статичні і циклічні параметри тріщиностійкості.

Встановлено, що з ростом наводнення, особливо, коли вміст водню перевищує $5 \text{ см}^3/100\text{г}$,



Оксана БЕРДНИК

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



Валерій МАКАРЕНКО

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



Наталія АМЕЛІНА

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

різко знижується як статична міцність, так і тривала міцність (втомиленість).

Причому, для цих областей розчину водню в арматурній сталі характерні в'язкий характер руйнування, в той час як для сильно наводненої арматури (від 5 до $12 \text{ см}^3/100\text{г}$ притаманне крихке руйнування по механізму мікротріщини в загартованій (мартенситній чи трооститній структурі).

Аналіз отриманих експериментальних результатів дозволив визначити оптимальний вміст водню в арматурній сталі (3-5 см³ 100г), перевищення якого спричинить зниження тріщиностійкості арматури в процесі тривалої експлуатації, особливо в корозійно-агресивних середовищах.

Питання втомленості арматурних сталей на сьогоднішній день, дуже актуальне.

Ключові слова. Тріщиностійкість; наводнення; втомленість; циклічність; арматура.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Відомо [1-5], що спротив металу втомленню характеризується межею витривалості (втомленості), тобто це найбільше напруження, яке витримує метал без руйнування при будь якій 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.

Із літератури [1] 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 [2-4], що зі збільшенням числа циклів при

будь який напруження 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 навантаженнях 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, після чого починається процес їх зливу в магістральну тріщину з розповсюдженням останньої.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Граничні напруження, при яких починається процес, наприклад, сірко-водневого руйнування (СВР) рекомендується розглядати в якості критеріїв для порівняння стійкості різних арматурних сталей [5,6]. Одним із важливих факторів, які впливають на стійкість проти СВР є склад і структура сталі. Так, суттєво впливає на СВР вуглець. Відомо [6,7], що із збільшенням кількості вуглецю схильність загартованих сталей до СВР зростає внаслідок підвищення внутрішніх напружень. Водень, дифундуючий в метал, навіть в невеликій кількості

($2-3\text{см}^3/100\text{г}$) не спричиняє достатніх для розвитку тріщин локальних пластичних деформацій в міцному металі. Прийнято вважати, що сталь втрачає зв'язко-пластичні характеристики при вмісті водню в межах $7-12\text{см}^3/100\text{г}$ [8]. Однак, як встановлено в роботі [9], воднева крихкість може проявлятися при незначній кількості абсорбційного (поглинутого) водню. Так, в сталі з границею міцності 1600МПа , легованій $0.7\%\text{Cu}$, $0.25\%\text{Mo}$, $1.8\%\text{Nb}$ і $0.025\%\text{Al}$ спостерігалось зниження пластичних властивостей (δ) з 45 до 3% на рівні наводнення $0.03\text{см}^3/100\text{г}$.

На наш погляд, таке явище можна пояснити із залученням сорбційно-електрохімічного механізму тривалої міцності (втомленості) [10].

Статична (воднева) втомленість обумовлена сорбційними процесами:

- 1) дифузією водню в дефекти кристалічної ґратки металу;
- 2) адсорбцією водню внутрішніми поверхнями кристалічної структури;
- 3) тиском молізованого водню в колекторах;
- 4) послабленням сил зв'язку між атомами в кристалічній ґратці металу.

Тобто, навіть достатньою зв'язкістю і пластичністю метал (наприклад, низьколегована сталь – $08\text{Г}2\text{С}$, 15ХСНД), внаслідок адсорбційного водню в мікродефектах (мікрокапілярах, порах) зародження мікротріщини полегшується із-за низького спротиву крихкого матеріалу.

Аналіз літературних даних свідчить, що згідно із сучасними фізико-механічними уявленнями про природу статичної втомленості металу існує критична концентрація водню, при досягненні якої різко послаблюються когезійні зв'язки в кристалічній решітці, тобто відбувається розрив міжатомних зв'язків. Згідно розробленої дифузійної моделі сегрегації водню, критична величина водню залежить від марки сталей, напруженого стану, умов експлуатації. В нашому випадку (підземна каналізаційна система) критичний рівень водню в арматурі дорівнює приблизно $5-6\text{см}^3/100\text{г}$ [11]. Цього об'єму достатньо для різкого прискорення процесу

зародження і розвитку тріщин (субмікротріщин). Тому потрібні відповідні заходи для впливу на дислокаційний механізм доставки водню в структуру арматури.

Встановлено, що відстань між смугами ковзання дислокацій $10^{-6} - 10^{-4}\text{см}$; величина ковзання – $10^{-7} - 10^{-5}\text{см}$. Критичне дотичне напруження $\tau = (10^{-5} - 10^{-7}) \cdot \mu$, де μ – модуль зсуву, рівний $1 \cdot 10^{11}/10^4\text{МПа}$. Нормальне напруження (перпендикулярне площині ковзання) $\sigma = (10^{-3} - 10^{-4}) \cdot \mu$. Теоретичну міцність решітки (міцність зсуву в досконалому кристалі) приймають $\sigma_T = \mu/30$. Приймають, що дислокації можуть концентруватися в окремих місцях, утворюючи комірку структуру (субзерна). Розмір субзерен (блоків) рівний $(10^{-6} - 10^{-4})\text{см}$.

В розрахунках напруження, необхідне для розриву сил зчеплення в металі, приймають рівним 85МПа . Слід приймати до уваги, що в структурі арматурних сталей дифузійно водню полегшують наявність мікродефектів, дислокацій, температурно-баричний градієнт та змінні навантаження (силовий фактор).

Встановлено, що переважна кількість дифузійного водню концентрується в пастках, причому енергія зв'язку атомів з ними дорівнює приблизно $N_B \approx 58.6\text{кДж/моль}$. В той же час його концентрація в матриці кристалічної ґратки зменшується до $10^2 - 10^3\text{см}^{-3}$, а в пастках $N_{B(p)}$. В таких умовах при температурах нижче $300-320\text{К}$ практично весь водень захоплюється дислокаціями і пастками, а в об'ємі матриці решітки концентрація майже нульова.

Як вже відмічалось вище, критична концентрація водню залежить від напружень в сталі і в значній мірі визначається структурним складом. Тому для визначення уповільненого руйнування по механізму водневого окрихчення, обумовлюючи статичну (водневу) втомленість необхідна бінарна комбінація критичних значень концентрації водню і механічних напружень. Критична концентрація водню створюється під впливом трьохмірного простору поля розтягувальних напружень направленої (збиральної) дифузії водню. Термін, на протязі якого досягається

критична величина ($S_{кр} + \sigma_{кр}$) відповідає інкубаційному періоду росту мікротріщини. Існують різні погляди на механізм зародження і розповсюдження тріщини, спричинених водневим окрихченням, але в найбільшій мірі заслуговує уваги гіпотеза молекулярного тиску водню, тобто основною причиною виникнення в несучільному металі арматури високого тиску водню, що спричиняє великі внутрішні напруження структури. Причому, в мікромасштабі дія водню може проявлятися не стільки в окрихченні, скільки в пластифікуванні металу.

В макромасштабі окрихчення виглядає як зниження граничного напруження руйнування в результаті локальної пластичної течії і руйнування мікрооб'ємів металу у вершини тріщини.

Механізм ініційованого воднем зародження мікротріщини і її подальший ріст передбачає послідовний ряд наступних частих процесів:

- проникнення і транспортування (по дифузійному чи дислокаційному механізму) атомів водню в області з підвищеною концентрацією напружень, тобто до вершин зародження мікротріщини.

- забезпечення підростання мікротріщини в результаті обумовленого воднем зниження пластичності наводненого металу.

В роботі [5], доведено, що водень на атомарно-чистих поверхнях субмікротріщин утворює шар аніонів в результаті чого змінюється енергетичний стан поверхні а отже поведінка субмікротріщини в полі напружень Крім того водень не впливає на величину межі текучості в широкому інтервалі температур Це свідчить про не вплив водню на рух дислокацій Така особливість дислокаційного механізму транспорту водню обумовлена аномально високим коефіцієнтом його дифузії і порівняно низькою енергією зв'язку з дислокаціями. Тому водневі атмосфери можуть легко переміщатися в об'ємі супроводжуючи дислокації які повільно рухаються і не гальмуючи їх.

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом досліджень була арматурна сталь наступних марок: 5; 35ГС; 20ГС; 08Г2С; 15ХСНД; Х18Н9, тобто сталі вуглецеві, низьколеговані, які мали структуру ферито-перлітну, сорбітну та трооститну і мартенситну з коефіцієнтом витривалості $K_B=0.40-0.50$. Вплив водню на межу витривалості та статичну межу міцності досліджували на зразках із сталі марки 20ГС які перед експериментами наводнювали до необхідного рівня в спеціальних камерах з водневим середовищем Вміст водню в сталевих зразках вирізаних з арматурних стрижнів визначали методом вакуум-плавки на хроматографічній установці VH-6 фірми Герреус (Німеччина) [10,11]. Тривалість наводнення зразків складала близько 72-780 год в залежності від необхідного об'єму наводнення.

Зразки циліндричної форми довжиною 162мм, з них робоча частина складала 50мм, а діаметр захоплення -70мм робочої частини – 10мм, що дозволяла арматура діаметром 32мм (рис.1, а)

Зразки сприймали деформацію згину з осьовим стиском-розтягуванням. База випробувань на тривалу втомленість складала $N=10^7$ циклів.

Після виготовлення зразки арматури надавали різним режимам термічної обробки в залежності від марки сталі і отримання потрібного виду структури. Зразки полірували шліфувальною шкуркою зернистістю 3/0, а потім піддавали відпуску у вакуумній камері при 620°C на протязі 30 хв для зняття залишкових напружень. Зразки випробували на уставці моделі "Інстрон" (Великобританія), Випробування проводили на згин з нульовим середнім напруженням і частотою циклів 20Гц. Випробування були проведені на повітрі.

Вплив агресивного середовища був відсутнім. Додамо, що випробування проводили згідно вимог Специфікації Міжнародної Асоціації корозійників. Фрактографічно-металогіфічні дослідження проводили із залучення електронного растрового мікроскопу моделі Джеол-35CF (Японія). Фрагмент арматурних стрижнів, з яких вирізали

зразки для наводнення з подальшим випробуванням на тривалу міцність та фактографічні дослідження, наведений на рис.1, б.

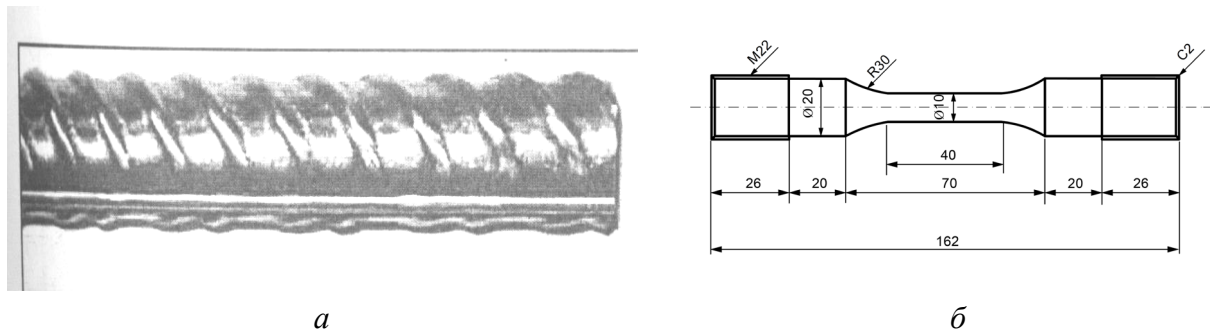


Рис.1. Випробувальні зразки:

a-випробування на втомну міцність (багато циклові випробування);

б-фрагмент дослідної арматури залізобетонної конструкції;

Fig.1 Test samples:

a-test for fatigue strength (many cycle tests);

b-fragment of experimental fittings of a reinforced concrete structure

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Результати експериментальних досліджень наведені на рис 2 і 3.

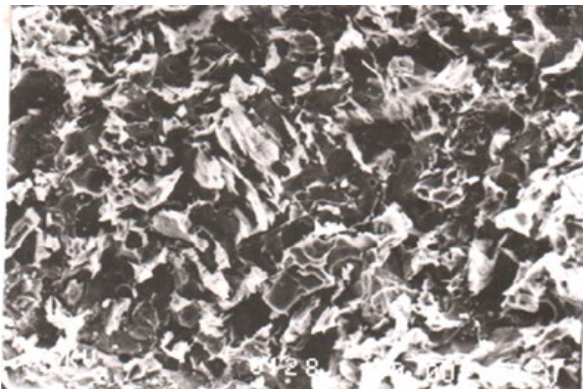


Рис.2. Фрактограма в'язкого руйнування (при розтягуванні) арматурних стрижнів залізобетонних конструкцій (термін експлуатації – 5 років)

Fig.2. Fractograma of viscous failure (in tension) of reinforcing bars of reinforced concrete structures (5 year service life):

Дані рис.2 свідчать про сильний вплив дифузійного водню на статичні і циклічні параметри тріщиностійкості. Як видно (див. рис.2), що з ростом наводнення, особливо, коли вміст водню перевищує $5 \text{ см}^3/100\text{г}$, різко знижується як статична міцність, так і тривала міцність (втомленість).

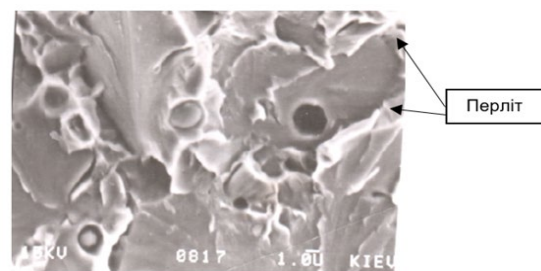


Рис.3. Фрактограма крихкого руйнування (при розтягуванні) арматурних стрижнів залізобетонних конструкцій тривалого терміну експлуатації (40 років)

Fig.3. Fractograma of brittle fracture (when stretched) of reinforcing rods of reinforced concrete structures with a long service life (40 years)

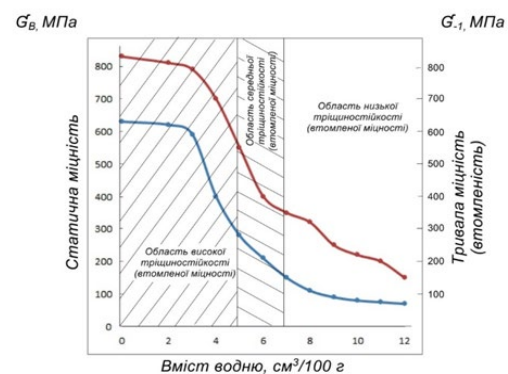


Рис.4. Графіки залежності втомної міцності (σ_{-1}) і статичної міцності ($\sigma_{\text{в}}$) від вмісту водню в зразках арматури..

Fig.4.: Graps of the dependence of fatigue strength and static strength on the content of hydrogen in the reinforcement samples

Причому, для цих областей розчину водню в арматурній сталі характерні в'язкий характер руйнування (рис.4), в той час як для сильно наводненої арматури (від 5 до 12 $\text{cm}^3/100\text{г}$) притаманне крихке руйнування по механізму мікротріщини (рис.5) в загартованій (мартенситній чи трооститній структурі).

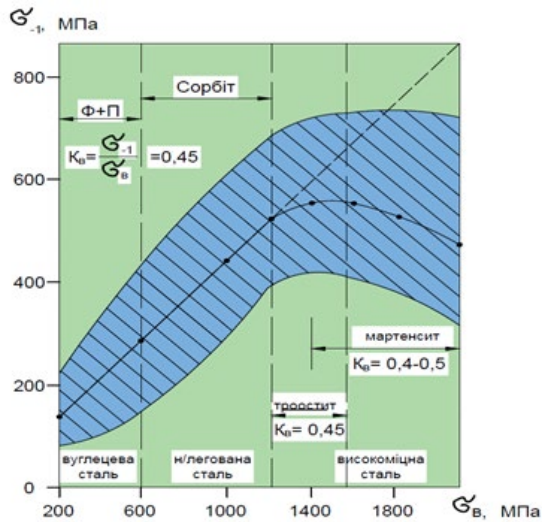


Рис.5. Вплив типу структури арматурної сталі її межу витривалості (σ_{-1})

Fig.5. Influence of the type of reinforcing steel structure on its endurance limit:

Аналіз отриманих експериментальних результатів дозволив визначити оптимальний вміст водню в арматурній сталі (3-5 $\text{cm}^3/100\text{г}$), перевищення якого спричинить зниження тріщиностійкості арматури в процесі тривалої експлуатації, особливо в корозійно-агресивних середовищах. Механізм впливу водню на тріщиностійкість металу при статичному і знакозмінному навантаженні наведені вище.

Результати досліджень викладені на рис.6 підтверджують дані рис.7. Так видно з рис.6, що вуглецеві і низьколеговані сталі, яким притаманна феритно-перлітна, а також сорбітна структура забезпечує високий спротив перш за все тривалій втомленості, а перехід до сталей зі структурою мартенситу чи відпущеної (перехідної струїти бейніту) структури трооститу різко знижує тріщиностійкість арматурної сталі, що унеможливає її використання при виготовленні ар-

матури задіяної в залізобетонних конструкціях, призначених для довготривалого терміну експлуатації (більше 50-60 років). Таким чином, отримана діаграма може бути рекомендована проектувальникам залізобетонних конструкцій гідротехнічного призначення, так як вона значно полегшує обґрунтований вибір арматури при розробці залізобетонних конструкцій відповідального і довготривалого призначення.

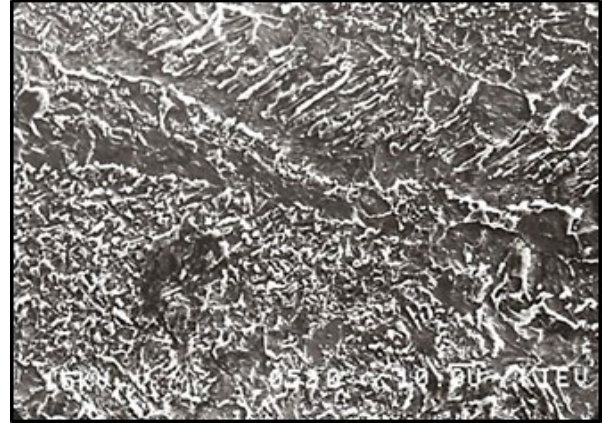


Рис.6. Структура перліту і цементитних голок (Fe_3C) при розпаді аустеніту арматурної сталі (20XCHDA) –(x500)

Fig.6. The structure of pearlite and cementite needles (Fe_3C) during the disintegration of austenite of reinforcing steel (20XCHDA) – (x500)

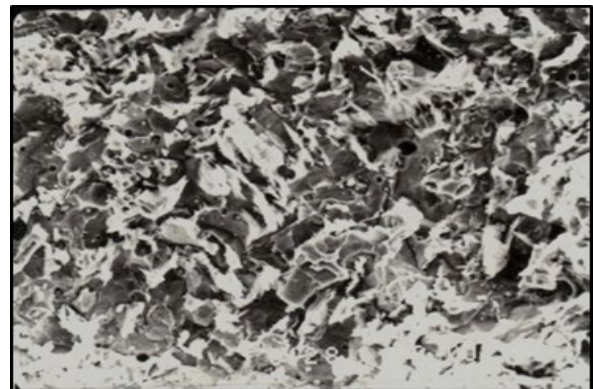


Рис.7. Мікροструктура мартенситу і залишкового аустеніту арматурної сталі (x600)

Fig.7. Microstructure of martensite and residual austenite of reinforcing steel:

Найбільш високою живучістю володіють сталі із структурою сорбіту відпуску. Це обумовлено низькою швидкістю росту втомної тріщини в зв'язку з високою пластичністю металу (рис.5) і наявністю розвинутої субструктури феритної фази сорбіту. Дислокаційні стінки, які розділяють феритні зерна слугують бар'єрами на шляху втомленої тріщини, яка в зв'язку з цим змушує змінювати свій напрямок розвиватися зигзагообразно і витратити більше енергії і часу на підростання до критичної величини. Крім того, сталь після термообробки на сорбіт відпуску становиться малочутливою до появи концентраторів напружень і випадковим ударним навантаженням.

Сталь термооброблена на тростит чи мартенсит відпуску має більш високий σ_{-1} , але її значний спротив утворенню втомних тріщин нейтралізується підвищеною чутливістю до якості поверхні. Додатково до цього високоміцні сталі характеризуються низьким спротивом розвитку тріщин.

Таким чином, умови експлуатації вимагають особливого поєднання високого спротиву утворенню втомної тріщини і високого спротиву її розповсюдженню, що практично неможливо забезпечити в арматурній сталі використовуючи легування і термообробку. Цю задачу розв'язують застосуванням поверхневих зміцнюючих технологій (поверхнева пластична деформація, хіміко-термічна обробка (ХТО), поверхнева загартовка) стосовно низько- чи середньовуглецевих сталей, обробленими на структуру сорбіт відпуску. В результаті отримують сталі з міцною поверхнею і в'язкою пластичною серцевиною

При поверхневому зміцненні використовуються два механізми підвищення циклічної довговічності, зокрема відбувається зростання спротиву деформацій поверхневих шарів металу і виникають залишкові напруження стиску перешкоджаючи зародженню і розвитку втомних тріщин. Поєднуючись із зовнішніми напруженнями, стискаючи напруження знижують рівень небезпечних розтягуючих напружень на поверхні

Ефективність застосування методів поверхневого зміцнення зростає з підвищенням концентрації напружень. Найбільш ефективним є комбінування різних методів зміцнення (ХТО, загартовка СВЧ) з поверх-

невим деформуванням оскільки останнє додатково (на 10-20%) підвищує твердість поверхневих шарів і рівень залишкових напружень стиску. Рекомендується використовувати ПАР, що перешкоджає розвитку процесу адсорбційної втомленості. Слід відмітити, що більшість технологій поверхневого зміцнення арматури позитивно впливають на її зносостійкість та циклічну довговічність.

В процесі термічної обробки арматурна сталь пройшла всі етапи аустенітного перетворення. Зокрема, як відомо, перлітне перетворення переохолодженого аустеніту носить кристалізаційний характер, за своїм механізмом є дифузійним. Це слідує з того, що аустеніт практично однорідний по концентрації вуглецю, розпадається з утворенням фериту (майже чисте залізо) і цементиту з вмістом 6.6%С, тобто суміші фаз, які мають різні концентрації вуглецю.

Зростання зародка цементиту йде за рахунок дифузії вуглецю з прилеглих об'ємів аустеніту. Це в кінцевому підсумку й приводить до перетворення його в ферит. Одночасно відбувається зростання товщини пластинок фериту і цементиту. Таким чином, на поверхні утвореного перлітного зерна також виникають зародки цементиту з іншою орієнтацією. Такий процес продовжується до зіткнення окремих зерен і перетворення всього аустеніту. Причому, чим нижче температура розпаду аустеніту, тим дисперсніше становиться ферито-цементитна суміш

При збільшенні порядку 1500 раз і вище, це чітко видно на електронному мікроскопі. Авторами даної роботи було встановлено, що між пластинчата відстань в перліті складає 0.5-1.2мкм, сорбіту ≈ 0.35 мкм і троститу ≈ 0.2 мкм.

Відомо, що проміжне перетворення протікає при низьких температурах охолодження аустеніту 400-200°C, коли дифузія атомів заліза практично неможлива, а дифузія атомів вуглецю порівняно легко. Тому дифузійний процес утворення фериту становиться неможливим, а утворення карбиду заліза і виділення його з аустеніту і фериту може відбуватися. Тому кінетика проміжного перетворення і утворені при цьому структурі мають особливості як дифузійного (перлітного) перетворення, так

і бездифузійного (мартенситного) перетворення.

В цілому механізм проміжного перетворення зводиться до наступного. В проміжному інтервалі температур переохолоджений аустеніт піддається перетворенню (розпаду) після деякого інкубаційного періоду. Спочатку всередині аустеніту відбувається дифузійний перерозподіл вуглецю, що приводить до утворення об'ємів аустеніту збагаченого і збідненого вуглецем. Ділянки аустеніту, збіднені вуглецем, зазнають бездифузійне перетворення $\gamma \rightarrow \alpha$. При бездифузійному перетворенні $\gamma \rightarrow \alpha$ змінюється тільки тип решітки (ГЦК \rightarrow ОЦК) без зміни в розташуванні атомів вуглецю, які знаходяться в аустеніті. Тому в результаті такого перетворення утворюється пересичений твердий α -розчин (мартенсит), який є нестабільною структурою і при ізотермічній витримці розпадається на феритно-цементитну суміш. Таким чином, в результаті проміжного перетворення утворюється структура, яка складається із суміші α -фази і карбіду (цементиту), яка зветься бейнітом, а інколи голчатим троститом. Таким чином, проміжне перетворення аустеніту поєднує в собі дифузійний перерозподіл вуглецю в аустеніті з бездифузійним (мартенситним) перетворенням $\gamma \rightarrow \alpha$. Слід відмітити, що у верхньому бейніті зосереджується, в основному, структура сорбіту подібна будові перліту, а в нижньому бейніті карбідні частки розташовані всередині пластини α -фази.

ВИСНОВКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Результати експериментальних досліджень засвідчили про сильний вплив дифузійного водню на статичні і циклічні параметри тріщиностійкості арматурної сталі. Встановлено, що з ростом наводнення, особливо, коли вміст водню перевищує $5 \text{ см}^3 / 100\text{г}$, різко знижується як статична міцність, так і тривала міцність (втомленість). Причому, для цих областей розчину водню в арматурній сталі характерні в'язкий характер руйнування, в той час як для сильно наводненої арматури (від 5 до 12

$\text{см}^3 / 100\text{г}$) притаманне крихке руйнування по механізму мікровідколу в загартованій (мартенситній чи трооститній структурі). Аналіз отриманих експериментальних результатів дозволив визначити оптимальний вміст водню в арматурній сталі ($3\text{-}5 \text{ см}^3 / 100\text{г}$), перевищення якого може спричинити зниження тріщиностійкості арматури в процесі тривалої експлуатації, особливо в корозійно-агресивних середовищах

Запропоновано механізм впливу водню на тріщиностійкість металу при статичному і знакозмінному навантаженні який полягає в дифузійному та дислокаційному переміщенні водню в структурі арматурного стрижня що в підсумку що спричиняє сильне наводнення сталі та її окрихчення

Встановлено, що вуглецеві і низьколеговані ситалі, яким притаманна феритно-перлітна, а також сорбітна структура забезпечують високий спротив, перш за все, тривалій втомленості, а перехід до сталей зі структурою мартенситу чи відпущеної (перехідної структури бейніту) структури бейніту різко знижує тріщиностійкість арматурної сталі, що унеможлиблює її використання при виготовленні арматури, задіяної в залізобетонних конструкціях, призначених для довготривалого терміну експлуатації (більше 50-60 років). Таким чином, отримана діаграма може бути рекомендована проектувальникам залізобетонних конструкцій гідротехнічного призначення, так як вона значно полегшує обґрунтований вибір арматури при розробці залізобетонних конструкцій відповідального і довготривалого призначення

ЛІТЕРАТУРА

1. 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) DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.864.115>
<https://www.scintific.net/KEM.864.115>
2. 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>
3. **Lipatov Y. V., Gutnikov S. I., Manylov M. S., Zhukovskaya E. S., Lazoryak B. I.** High alkali-resistant basalt fiber for reinforcing concrete // *Materials & Design*. – 2015. – V. 73. – P. 60–66
 4. **Jun Z.** Application and research status of concrete canvas and its application prospect in emergency engineering. - *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. 2020. 15 p.
 5. **Xu J.,** Design of functional cotton fabric via modified carbon nanotubes. - *Pigment and Resin Technology*. 2020. Vol. 49 (1). pp. 71-78.
 6. **Kundu C.K.** Sol-gel coatings from DOPO-alkoxysilanes: Efficacy in fire protection of polyamide 66 textiles. - 2020. Vol. 125. 109483.
 7. **Malucelli G.** Sol-Gel and layer-by-layer coatings for flame-retardant cotton fabrics: Recent advances. - *Coatings*. 2020. Vol. 10 (4). pp. 333.
 8. **Vachnina T.N.** Improvement of fire protection of wood board and textile materials for premises with a massive stay of people. - *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 962 (2). 022008.
 9. **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.
 10. **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.
 11. **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)
 DOI:<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.864.115>
<https://www.scintific.net/KEM.864.115>
 12. **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)
 13. **Pokhodnya, I. K., Ponomarev, V. E., Mili-chenko, 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.
 14. **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.
 15. **Makarenko V.** Hydrate Formations Model-ing for the Oil and Gas Facilities Reconstruc-tion. / Makarenko V., Vynnykov Y., Liashenko A., Pet-rash O // *Proceedings of the 2nd Inter-national Conference on Building Innova-tions. ICBI 2019. Lecture Hydrate Formations Modeling for the Oil and Gas Facilities Re-construction Notes in Civil Engineering, vol 73. Springer, Cham*. – p. 651-658.
 16. **Xu J.** Synthesis and properties of cotton fabric functionalized by dimethyl phosphite and per-fluorohexyl group grafted graphene oxide. /Zhang J., Xu J., Zhang Z., Zhang H. // *Pigment and Resin Technology*. 2020. Vol. 48 (6). pp. 515-522.
 17. **Shi F.** Study on UV-protection and hydrophobic properties of cotton fabric functionalized by gra-phene oxide and silane coupling agent. /Xu J., Zhang Z. // *Pigment and Resin Technology*. 2019. Vol. 48 (3). pp. 237-242.
 18. **Choi K.** Fire protection behavior of layer-by-layer assembled starch-clay multilayers on cot-ton fabric. /Seo S., Kwon H., Kim D., Park Y.T. // *Journal of Materials Science*. 2018. Vol. 53 (16). pp. 11433-11443.
 19. **Dolez P.I.** A quantitative method to compare the effect of thermal aging on the mechanical perfor-mance of fire protective fabrics. /Tomer N.S., Malajati Y. // *Journal of Applied Polymer Sci-ence*. 2019. Vol. 136 (6). 47045. 7 p.
 20. **Zhou S.** Flame Retardancy and Mechanism of Cotton Fabric Finished by Phosphorus Contain-ing 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.
 21. **Kundu C.K.** Sol-gel coatings from DOPO-alkoxysilanes: Efficacy in fire protection of poly-amide 66 textiles. /Song L., Hu Y. // *European Polymer Journal*. 2020. Vol. 125. 109483.
 22. **Malucelli G.** Sol-Gel and layer-by-layer coat-ings for flame-retardant cotton fabrics: Recent advances. // *Coatings*. 2020. Vol. 10 (4). pp. 333.

23. **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.
24. **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.

REFERENCES

1. **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>
2. **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://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/907/1/012036/pdf>
3. **Lipatov Y. V., Gutnikov S. I., Manylov M. S., Zhukovskaya E. S., Lazoryak B. I.** High alkali-resistant basalt fiber for reinforcing concrete // *Materials & Design*. – 2015. – V. 73. – P. 60–66
4. **Jun Z.** Application and research status of concrete canvas and its application prospect in emergency engineering. - *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. 2020. 15 p.
5. **Xu J.,** Design of functional cotton fabric via modified carbon nanotubes. - *Pigment and Resin Technology*. 2020. Vol. 49 (1). pp. 71-78.
6. **Kundu C.K.** Sol-gel coatings from DOPO-alkoxysilanes: Efficacy in fire protection of polyamide 66 textiles. - 2020. Vol. 125. 109483.
7. **Malucelli G.** Sol-Gel and layer-by-layer coatings for flame-retardant cotton fabrics: Recent advances. - *Coatings*. 2020. Vol. 10 (4). pp. 333.
8. **Vachnina T.N.** Improvement of fire protection of wood board and textile materials for premises with a massive stay of people. - *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 962 (2). 022008.
9. **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.
10. **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.
11. **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) DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.864.115> <https://www.scintific.net/KEM.864.115>
12. **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://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/907/1/012036/pdf>
13. **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.
14. **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.
15. **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](https://doi.org/10.1088/1757-899X/907/1/012036/pdf). ICBI 2019. *Lecture Hydrate Formations Modeling for the Oil and Gas Facilities Reconstruction Notes in Civil Engineering*, vol 73. Springer, Cham. – p. 651-658.
16. **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.
17. **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.
18. **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.
 19. **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.
 20. **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.
 21. **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.
 22. **Malucelli G.** Sol-Gel and layer-by-layer coatings for flame-retardant cotton fabrics: Recent advances. // *Coatings*. 2020. Vol. 10 (4). pp. 333.
 23. **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.
 24. **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 THE RELATIONSHIP
BETWEEN THE STRENGTH LIMIT
AND LONG-TERM FATIGUE OF
STEEL REINFORCEMENT OF
REINFORCED CONCRETE
STRUCTURES WITH A LONG SERVICE
LIFE IN AGGRESSIVE
ENVIRONMENTS**

*Oksana BERDNYK,
Valeriy MAKARENKO,
Nataliya AMELINA*

Summary. It is known that the fatigue process begins with plastic deformation of the surface layers of the reinforcement metal. Moreover, the movement of dislocations in the conditions of repeatedly alternating stresses is observed at loads below the elastic limit of the metal. The rate of local plastic deformation during cyclic deformation is several orders of magnitude higher than the rate of deformation under static loading. Slip of dislocations begins in grains with a favorable orientation near the stress concentrators. With an increase in the number of cycles in the surface layers, the density of dislocations and the number of vacancies increases. When the basic number of NR cycles is reached, a surface hardened metal layer is formed with a large number of seed cracks, the size of which does not reach a critical value. An increase in the number of cycles cannot cause further development of destruction in such a layer. Only when the stresses exceed the endurance limit do the cracks reach a critical length, after which the process of their draining into the main crack begins with the propagation of the latter. The results of experimental studies indicate a strong influence of diffusible hydrogen on the static and cyclic parameters of crack resistance. It was established that with the increase of flooding, especially when the hydrogen content exceeds 5 cm³/100g, both the static strength and long-term strength (fatigue-laziness) decrease sharply. Moreover, these areas of the hydrogen solution in the reinforcing steel are characterized by a viscous nature of fracture, while for heavily flooded reinforcement (from 5 to 12 cm³/100g, brittle fracture by the mechanism of micro-split in the hardened (martensitic or troostite structure) is inherent.

The analysis of the obtained experimental results made it possible to determine the optimal content of hydrogen in reinforcing steel (3-5 cm³/100g), the excess of which will cause a decrease in the crack resistance of the reinforcement in the process of long-term operation, especially in corrosive and aggressive environments.

The issue of fatigue of reinforcing steels is very relevant today.

Keywords. Crack resistance; flooding; fatigue; cycling; reinforcement.

Стаття надійшла до редакції 15.05.2024 р.