

УДК 621.791.11.682

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РІДКОЗЕМЕЛЬНИХ І ЛУЖНОЗЕМЕЛЬНИХ МІКРОДОБАВОК НА В'ЯЗКО-ПЛАСТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ І КРИХКУ МІЦНІСТЬ ХОЛОДОСТІЙКОЇ НИЗЬКОЛЕГОВАНОЇ СТАЛІ

В.Д. Макаренко,

д-р техн. наук, професор

В.І. Гоц,

д-р техн. наук, професор

О.В. Ластівка,

д-р техн. наук, доцент

О.О. Томін,

канд. техн. наук, доцент

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ

DOI: 10.32347/2410-2547.2026.116.521-530

У роботі досліджено вплив рідкоземельних (Ce, Y) та лужноземельних (Ca, Ba) мікродобавок на в'язко-пластичні властивості, тріщиностійкість і крихку міцність низьколегованої сталі 17Г1С. Показано, що модифікування сталі цими елементами сприяє роздрібненню структури та підвищенню дисперсності неметалевих включень, що забезпечує зростання критичної інтенсивності напружень, ударної в'язкості та зменшення швидкості росту тріщин. Результати свідчать, що застосування рідкоземельних і лужноземельних мікродобавок дозволяє значно покращити механічні характеристики сталі та підвищити її експлуатаційну надійність у складних умовах роботи трубопроводів.

Ключові слова: низьколегована сталь, холодостійкість, в'язко-пластичні властивості, тріщиностійкість, крихка міцність, рідкоземельні та лужноземельні мікродобавки, модифікування сталі, механічні випробування, роздрібнення структури та неметалеві включення.

Вступ. В умовах експлуатації нафтогазових трубопроводів у агресивних корозійних середовищах та при змінних навантаженнях особливо актуальним є підвищення в'язко-пластичних властивостей та тріщиностійкості низьколегованої сталі. Традиційні методи легування, наприклад нікелем, молібденом чи ванадієм, не завжди забезпечують достатню стабільність механічних характеристик металу, особливо у випадках, коли ресурс трубопроводів вже вичерпаний. Ефективним шляхом підвищення деформаційної здатності та крихкої міцності сталі є модифікування її рідкоземельними (РЗМ) та лужноземельними (ЛЗМ) мікродобавками, що сприяє роздрібненню структури металу і підвищенню дисперсності неметалевих включень.

Основні положення і формулювання проблематики. Із літератури [1-7] і металургійної практики прийнято вважати, що найбільш ефективним способом підвищення деформаційної здатності тріщиностійкості металу труб при статичних і циклічних навантаженнях є економне модифікування його мікродобавками, які містять рідкоземельні і лужноземельні елементи або їх з'єднання. Особливо це важливо, коли повністю вичерпаний ресурс підвищення механічних і в'язко-пластичних характеристик традиційно застосованими елементами, наприклад, нікелем, молібденом, титаном, ванадієм, ніобієм і ін. Однак, легування металу труб за часту не забезпечує високих і стабільних значень механічних властивостей, особливо коли трубопроводи експлуатуються в агресивно-корозійних середовищах нафтогазових родовищ України. За таких умов, при наявності знакозмінних навантажень ресурс роботи трубопроводів скорочується [6-15]. Так, наприклад, термін служби трубопроводів для закачування в свердловини сточних вод на ряді нафтових родовищ Західної України складає 2-3 роки замість запланованих 10-15 років.

Так, як промислові трубопроводи достатньо металоємні і технічно складні спорудження, проблема підвищення їх експлуатаційної надійності і довговічності є вельми актуальною і важливою в цілому для нафтогазової галузі України.

Мета роботи - експериментально дослідити вплив модифікуючих мікродобавок рідкоземельних і лужноземельних на в'язко-пластичні властивості тріщиностійкість і крихку

міцність холодостійкої низьколегованої сталі марки 17Г1С, що широко використовується для виготовлення нафтогазопроводів, зокрема на її тріщиностійкість, в'язко-пластичні властивості та крихку міцність, з подальшою оцінкою ролі структурних елементів у процесі руйнування металу, для чого досліджували в'язко-пластичні характеристики, зародження і розповсюдження тріщин, показники крихкої міцності металу. Для цього необхідно було провести серію експериментів, зокрема механічні випробування в статичному і динамічному режимах.

Методика досліджень, матеріали, лабораторно-дослідне обладнання. В досліді використовували наступні мікродобавки: рідкоземельні елементи – церій і ітрій; лужноземельні елементи: – барій і кальцій. Перспективним, на нашу думку, є маловивчений елемент – цирконій, який використаний для порівняння отриманих результатів. Для вивчення особливості крихкого руйнування металу дослідної сталі, легованої нікелем, молібденом і ванадієм піддавали механічним випробуванням. Модифікуючі добавки знаходилися у вигляді металічного порошку, хімічний і гранулометричний склад їх відповідав відповідно ГОСТам і ТУ, наведеними в роботах [1-6].

Зразки отримували із виплавлених в індукційній печі сталевих злитків, хімічний склад яких відповідав низьколегованій сталі марки 17Г1С: 0.14-0.21%С; 0.33-0.66 % S; 1.20-1.50% Mn; 0.10-0.16%Ті. Вміст мікродобавок в сталі змінювався в наступних межах (в %): 0.02-0.06 Zr; 0.007-0.030Ba; 0.001-0.004Ca; 0.01-0.04 Y; 0.01-0.045Ce; 0.5-1.5 Ni; 0.3-0.9 Mo; 0.02-0.06 V.

Першу серію зразків піддавали механічним випробуванням, зокрема визначали показники в'язкості металу – параметри критичної інтенсивності напружень (K_{IC} , МПа·м^{1/2}) і критичного розкриття тріщини (δ_C , мм), які характеризуються як спротив металу крихкому руйнуванню [5-9]. Крім того, визначали ударну в'язкість на зразках з гострим надрізом по Шарпі (KCV).

На другій серії зразків вивчали тріщиностійкість металу, тобто кінетику руйнування і спротив матеріалу розвитку зародженої тріщини. Критерієм тріщиностійкості служила швидкість росту тріщини (V , мм/цикл) [16-21]. Для визначення характеристик K_{IC} і δ_C готували зразки потрібних розмірів [22-25]. Втомні тріщини в зразках створювали за допомогою гідро пульсатора CDM-10 (Німеччина) при частоті навантаження 10-15 Гц і коефіцієнту асиметрії циклу $r = 0.1-0.2$. Випробування з метою визначення параметрів в'язкості руйнування проводили на установці УМЕ-10. Для вивчення процесу руйнування використовували призматичні зразки розміром 140×20×12 мм (з поперечним розташуванням зварного шва). В зоні сплавлення основного металу і металу шва механічним способом наносили один крайовий напівкруглий надріз типу Менаже, глибиною 1 мм, в площині, перпендикулярній до дії головного напруження при згині зразка. Зразки випробували при 20°C в жорсткому режимі навантаження згином до заданих початкових амплітуд деформацій $E_a = 0.4$ і 0.7% з трапецеїдальною формою циклу. Тривалість напівциклу розтягування τ складала 24 год; тривалість циклу стиску - $\tau = 20$ хв.

Для отримання діаграм $V = f(N)$ проводили численне диференціювання плавної залежності $C = f(N)$, де C – глибина тріщини. Отриману діаграму в координатах $V = f(N)$ апроксимували кусково-прямолінійними ділянками з різним нахилом, точки пересічення яких характеризують моменти збільшення чи зменшення швидкості росту тріщини. Співставлення швидкості росту тріщини в сталевих зразках дозволяє виявити матеріали найбільш стійкі до локального руйнування в зоні термічного впливу. Структуру зразків вивчали на растровому електронному мікроскопі “GSM-35CF” (фірми “Джеол”, Японія). Число неметалевих включень визначали на енергодисперсійному спектрометрі “Лінк-860” (фірми «Лінк», Великобританія). Визначення об'ємної частки f і розмірів неметалевих включень $d_{вкл}$ проводилися на кількісному телевізійному мікроскопі “Квантімент – 720” (фірма “Металс рисерч”, Великобританія). Металеві включення розміром менше 1 мкм додатково аналізували на растровому електронному мікроскопі “GSM-35CF”.

Результати експериментальних досліджень. Результати механічних випробувань наведені на рис. 1-5. З рис. 1 видно що із збільшенням вмісту дослідних мікродобавок (ітрія, церія, барія, кальція, цирконія) покращуються параметри в'язкості сталі, зокрема підвищуються значення критичного коефіцієнту інтенсивності напружень K_{IC} і розкриття тріщин δ_C , а також ударна в'язкість KCV (рис. 3).

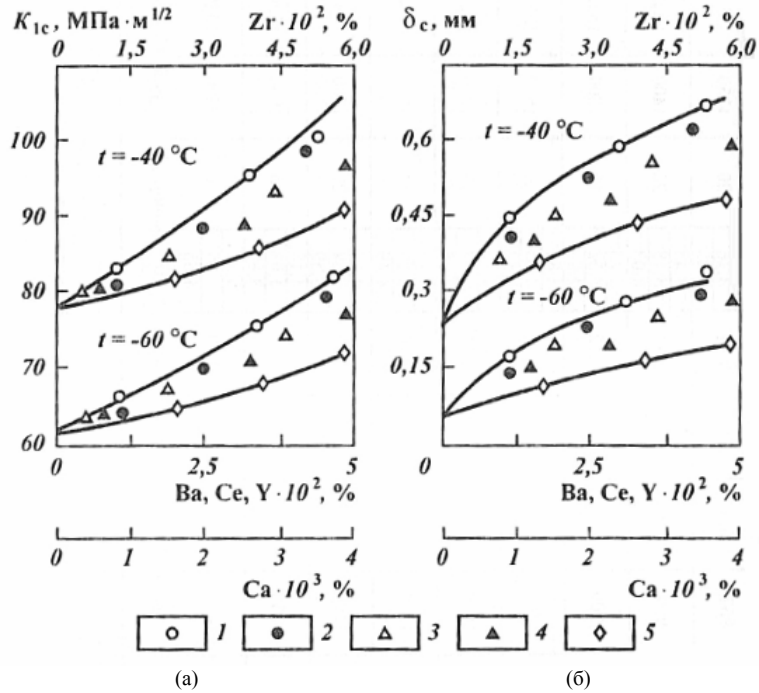


Рис. 1. Графіки залежності K_{1c} (а) і δ_c (б) від вмісту мікродобавок в дослідних сталях: 1 – Zr; 2– Ba; 3– Ce; 4– Y; 5– Ca

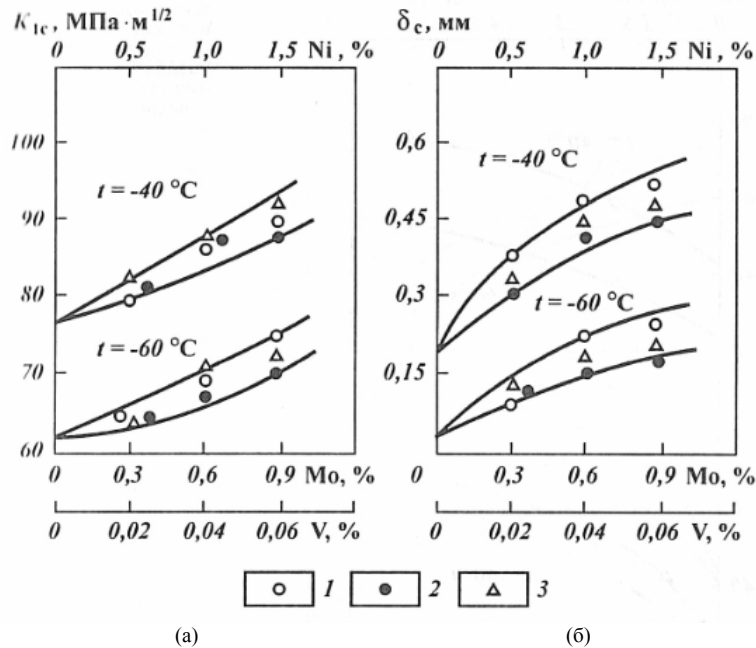


Рис. 2. Графіки залежності коефіцієнтів K_{1c} (а) і δ_c (б) від вмісту Ni, Mo, V в дослідних сталях: 1– Ni; 2– Mo; 3– V

По ступеню впливу на в'язко-пластичні характеристики (K_{1c} , δ_c , KCV) дослідних сталей використані мікродобавки можна розташувати в наступний ряд (по мірі збільшення стійкості проти крихкого руйнування): Zr, Ca, Ba, Y, Ce. Ця ж закономірність спостерігається і при дослідженнях кінетики росту тріщини в сталевих зразках, легованих мікродобавками (Zr, Ca, Ba, Y, Ce).

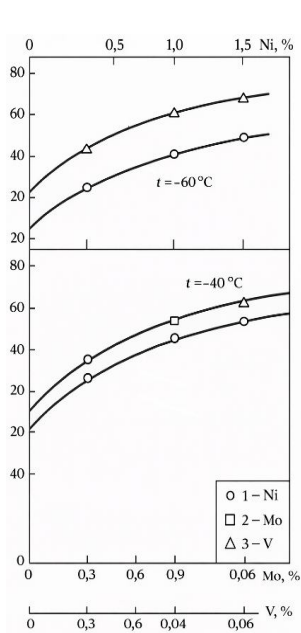


Рис. 3. Графіки залежності ударної в'язкості по Шарпі КСВ від вмісту Ni (1), Mo (2) і V(3) в дослідних сталях. Зразки з надрізом по Шарпі

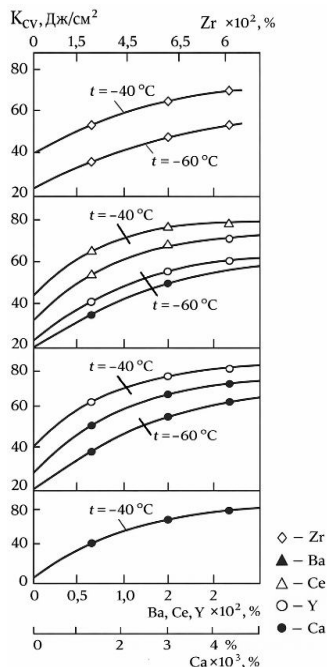


Рис. 4. Графіки залежності ударної в'язкості КСВ від вмісту мікродобавок в дослідних сталях. Зразки з надрізом по Шарпі: 1 – Zr; 2 – Ba; 3 – Ca; 4 – Ce; 5 – Y

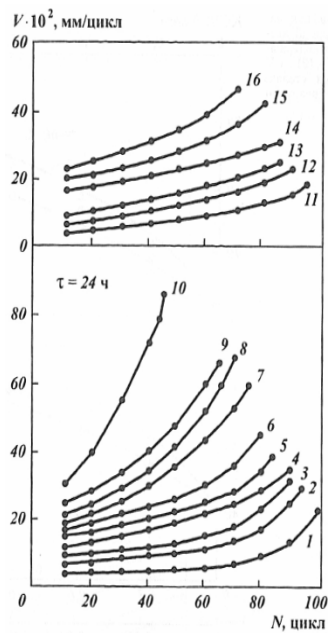


Рис. 5. Графіки швидкості росту тріщини в сталевих зразках, легованих (в %): Ce – 0.01(1), 0.03(2), 0.0459 (3); Y – 0.01(11), 0.025 (12), 0.04 (13); Ba – 0.007(4), 0.015(5), 0.030(6); Ca – 0.001(14), 0.0025(15), 0.004(16); Zr – 0.02(7), 0.04(8), 0.006(9); сталь 17Г1С (10)

Аналіз отриманих даних (рис. 5) показує, що висока швидкість росту тріщин (аж до самого руйнування) притаманна сталевим зразкам, які не містять модифікаторів. Так, при 50 циклах навантаження в зразках (сталь 17Г1С) швидкість росту тріщини досягає критичного значення ($85 \cdot 10^{-2}$ мм/цикл) і зразок руйнується. По мірі переходу від Zr до Ce (рис. 5) швидкість росту тріщини зменшується, не дивлячись на збільшення числа циклів N. Найменшими значеннями швидкості росту тріщини характеризується сталь, легована Ca, Ba, Y і Ce, хоча число циклів складає відповідно 70-85, 80-90, 90-105 і 90-110. Отримані результати свідчать про те, що легуючі компоненти суттєво впливають на структуру, яка відображає високу чутливість до характеристик процесу накопичення ушкоджень і локального руйнування зварних з'єднань [24-25]. Результати комплексних випробувань дають можливість припустити, що головною причиною покращення механічних характеристик дослідних сталей є позитивні зміни мікроструктури металу, легованого церієм, ітрієм, барієм, кальцієм і цирконієм. Для виявлення ступені цього впливу, нами були проведені фрактографічні дослідження зламів зразків, підданих руйнуванню на повітрі.

Порівняння даних структурного і мікрорентгеноспектрального аналізів дозволяє припустити, що вони зміщують область $\gamma - \alpha$ - перетворень в сторону більш низьких температур, сприяючи тим самим утворенню достатньо дрібнозернистої і однорідної структури нижнього бейніту з мінімальною шириною феритної фази. Така структура, як відомо [25], забезпечує високі механічні властивості металу шва, зокрема його ударної в'язкості. Кількісну оцінку впливу структурного стану металу на механічні властивості давали, використовуючи сучасну теорію руйнування, основу на моделі мікроскопу [18, 19], що дозволяє зв'язати конкретні структурні елементи дослідного металу з критичним (мінімальним) напруженням крихкого руйнування в температурній області в'язко-крихкого переходу за допомогою простих співвідношень для низьковуглецевої низьколегованої сталі і армоко-заліза (для яких коефіцієнт інтенсивності напружень в момент руйнування): $K_R = 6 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$; (1) для сталі з глобулярною

формою частинок другої фази (наприклад, неметалеві включення) $K_{MC} = K_p \cdot d_c$; де $K_p = 0.8 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, R_{MC} – напруження мікроскопу, МПа, d_3 – розмір зерна, м; d_c – діаметр глобулярної частинки другої фази, м.

Так як, в умовах загальної мікротекучості (при досягненні прикладним напруженням межі текучості) субмікротріщини виникають на границях зерен металу з подальшим відколюванням (зрізом) частинок другої фази, причому рівень крихкої міцності контролюється тим структурним параметром, який ініціює велику зародкову субмікротріщину [23-25]. В більш ранніх роботах Гриффітса [1-3] теорія руйнування була заснована на припущенні, що в матеріалі завжди мають місце готові тріщини. Згідно сучасним уявленням утворення тріщин пояснюють за допомогою теорії дислокацій – їх накопиченням перед перешкодою, наприклад, границями блоків і зерен, впливом дислокацій і ін. Деякі приклади дислокаційних моделей зародження субмікротріщин наведені на рис. 6. Відношення напруження мікровідколу R_{MC} до умовної межі текучості $\sigma_{0.2}$, назване в роботі [16] коефіцієнтом в'язкості K_B , який характеризує потенційні можливості металу чинити спротив крихкому руйнуванню: чим більша різниця між значеннями R_{MC} і $\sigma_{0.2}$, тим більше перенапруження (обумовлене швидкістю деформування, температурою випробування, видом напруженого стану) він може витримувати без ризику виникнення мікровідколу з наступним руйнуванням.

Дані металографічного аналізу свідчить про те, що вторинна структура дослідних зразків характеризується рівновісними феритними зернами. Виявлені також неметалеві включення, розташовані як в тілі зерен, так і по їх границях. Спеціальне травлення (з використанням підігрітої пікринової кислоти) проведене з ціллю виявлення границь зерен (типовий випадок наведений на рис. 6), дозволило визначити розміри d_3 ефективних структурних елементів, на границях яких в умовах загальної текучості виникають субмікротріщини, які ініціюють мікровідкол. Легування металу нікелем, молібденом, ванадієм і модифікуючими добавками (Ce, Y, Ca, Ba і Zr) приводить до роздрібнення зерен його структури. Особливо помітно це проявляється при використанні Ce, Y, Ca, Ba. Звертає на себе увагу те, що легуючі елементи такі як Ni, Mo, та V, при збільшенні їх вмісту в сталі, майже не роздрібнюють неметалеві включення. В той же час Ce, Y, Ca та Ba, наряду з роздрібненням зерен структури підвищують дисперсність неметалевих включень. Ця різниця відображається на результатах визначення рівня крихкої міцності.

Встановлено, що не дивлячись на зменшення розміру зерна d_3 структури, легованої Ni, Mo і V, значення напруження мікровідколу залишилися, практично на одному рівні (920-980 МПа), тоді як відповідно з розрахунками по формулі (1) повинна спостерігатися помітний ріст крихкої міцності $R_{ВІД}^{ТЕОР}$. В той же час зразки, модифіковані Ce, Y, Ca, Ba характеризуються високою крихкою міцністю, зокрема значення $R_{ВІД}^{ТЕОР}$ збільшуються з 950 МПа до 1490-2350, 1480-2380, 1280-1450, 1200-1450 відповідно. Для них розрахункові значення $R_{ВІД}^{ТЕОР}$ рівні (в МПа): 1100-1463 (Ce); 995-1280 (Y); 952-1200 (Ba); 1000-1428 (Ca) і 890-1075 (Zr).

Невідповідність результатів розрахунку експериментальним даним для матеріалу, модифікованого вказаними вище елементами, можна пояснити тим, що в дослідних зразках мікровідкол спричиняється не джерелом виникнення субмікротріщин, а іншим формуючим джерелом, що створює зародкові субмікротріщини більшого розміру, які вимагають меншого критичного напруження для цього розвитку.

В роботах [19-21] показано, що при певних умовах рівень крихкої міцності залежить від дисперсності і характеру розподілення глобулярних частинок вторинної фази. В той же час частинки, які розташовані в тілі зерна, об'ємна частка яких не перевищує 45%, не можуть бути джерелами руйнування. В цьому випадку зародження і підростання субмікротріщин до

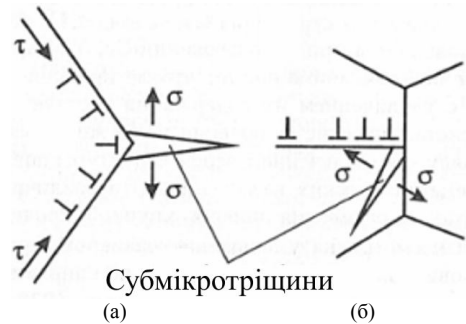


Рис. 6. Приклади дислокаційних моделей зародження субмікротріщини: (а) – при перетині площини ковзання дислокацій; (б) – при накопиченні дислокацій у границі зерна (перешкоди); τ – дотичні напруження, спричинені переміщенням дислокацій; σ – максимальні нормальні напруження

критичних розмірів ініціюється неметалевими включеннями, розташованими на границях зерен. Напруження мікровідколу визначають за формулою [18]:

$$R_{\text{ВІД}} = K_p \cdot d_{\text{ч}}^{1/2}, \quad (2), \quad \text{де } K_p = 1.1 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}.$$

Найбільш ймовірний діаметр $d_{\text{ВКЛ}}$ таких частинок в дослідних зразках знаходили, використовуючи гістограму розподілення неметалевих включень за розмірами (рис. 8).



Рис. 7. Типова структура металу (x2000), легованого РЗЕ і ЛЗЕ

неметалевих включень в процесі крихкого руйнування металу, дослідні зразки піддавали термічній обробці – загартуванню (температура аустенізації 950°C) з відпуском при 380°C . Термообробка призвела до зміни структури у всіх зразках як по фазовому складу, так і по величині зерна (відбулося їх роздрібнення), але не відобразилося на розмірах неметалевих включень (рис. 7). Вони являють собою складно леговані оксиди і окисульфідні, температура розплаву яких складає близько 1600°C [8-12], що значно перевищує температуру термообробки (рис. 9). Як показують експериментальні дослідження, після термообробки практично не змінювався рівень значень напруження мікровідколу $R_{\text{МВК}}^{\text{ЕКСП}}$, який відповідає розрахунковим значенням $R_{\text{ВІД}}^{\text{ТЕОР}}$ згідно рівняння (2).

Отримані результати дозволяють стверджувати, що в дослідних сталевих зразках рівень крихкої міцності визначається не величиною зерен, а дисперсністю частинок вторинної фази – неметалевих включень. Крім того, коефіцієнт в'язкості сталі $K_B = (R_{\text{ВІД}}/\sigma_{0,2})$

також в багатьох випадках залежить від розміру неметалевих включень. Роздрібнення структури сприяє збільшенню умовної межі текучості $\sigma_{0,2}$, але при постійному рівні напруження мікровідколу $R_{\text{ВІД}}$ це неминуче призведе до падіння запасу в'язкості і тим більше, чим вище темп росту границі текучості.

Порівняння розрахункових і експериментальних результатів дозволяє зробити висновок про двояку роль неметалевих включень: а) вони ініціюють зародження субмікротріщин на границі зерен; б) контролюють процес їх росту аж до крихкого руйнування дослідних сталей.

Роздрібнення неметалевих включень Се, Y, Ca, Ba і Zr, не дозволило значно підвищити стійкість металу до крихкого руйнування наряду з роздрібненням мікроструктури частинок вторинної фази [20, 22]. Тому напруження мікровідколу $R_{\text{МВК}}^{\text{ЕКСП}}$ зростає з 950 до 1130 МПа, що добре корелює з розрахунковими значенням $R_{\text{ВІД}}^{\text{ТЕОР}}$, рівними 915-2440 МПа.

Для обґрунтування ролі

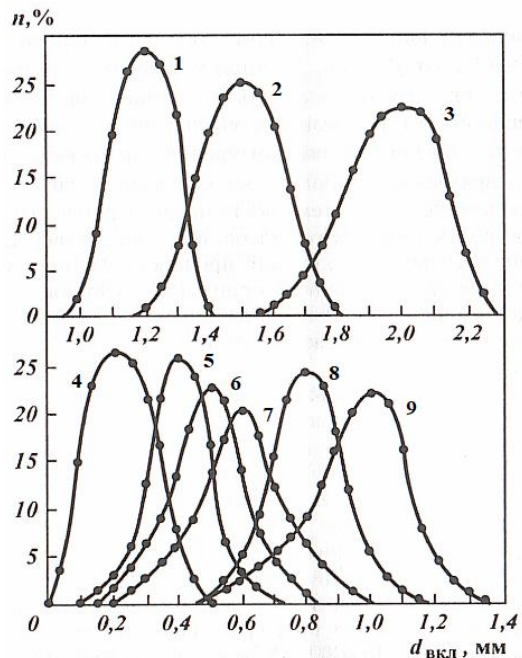


Рис. 8. Розподілення імовірної щільності неметалевих включень за розмірами

Аналіз отриманих результатів дозволяє стверджувати, що суттєві підвищення крихкої міцності низьколегованої сталі досягається реалізацією принципу, поєднуючого необхідну і достатню умови, зокрема:

а) максимально можливе роздрібнення структури (необхідна умова);

б) максимально можлива дисперсність неметалевих включень (достатня умова).

Для реалізації цього принципу на практиці низьколеговану сталь бажано економічно модифікувати такими елементами, як Се, Y, Са, Ва і Zr, які роздрібнюють не тільки структуру сталі, а й неметалеві включення. Суттєве підвищення крихкої міцності металу досягається застосуванням, в якості модифікаторів Се, Y, Са, Ва, що дозволяє повністю реалізувати їх металургійний потенціал.

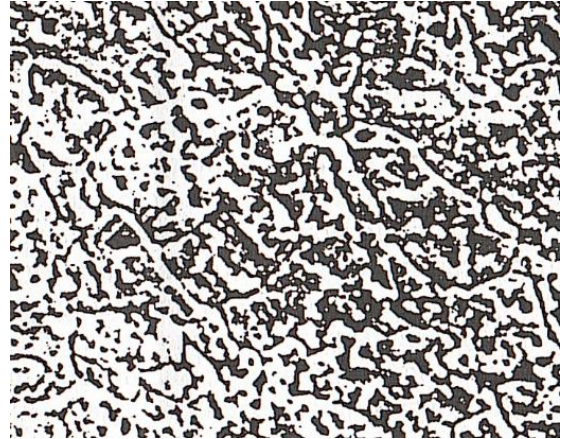


Рис. 9. Типова структура металу після термообробки (x2000)

Висновки

За результатами отриманих даних встановлено наступне:

1. Встановлені оптимальні концентрації модифікуючих добавок, при введенні яких в низьколеговану сталь в процесі її виплавки, значно зростають в'язко-пластичні характеристики і показники крихкої міцності і тріщиностійкості металу (в %): церій 0.01-0.03; ітрій 0.01-0.025; барій 0.007-0.015; кальцій 0.001-0.0025; цирконій 0.02-0.04;

2. Встановлено, що модифікуючі добавки, які вводяться в сталь в межах, вказаних в п.1, сприяють росту тріщиностійкості низьколегованої сталі в широкому діапазоні температур (від +20 до -60°C).

3. Встановлена контролююча роль неметалевих включень глобулярної форми (як правило, оксиди і окисульфід) в процесі крихкого руйнування холодостійкої сталі легованої Ni, Mo, V, Nb, які сприяють роздрібненню мікроструктури, а PЗЕ, ЛЗЕ і Zr, крім того ще й частинок другої фази (неметалевих включень). Вважається, що неметалеві включення виявляються джерелом зародження субмікротріщин на границях зерен і обмежують, тим самим, підвищення запасу в'язкості металу.

4. Встановлено, що наявність вказаних вище неметалевих включень не дозволяє реалізувати ефект сприятливого впливу нікелю, молібдену і ванадію на рівень крихкої міцності, не дивлячись на роздрібнення зерна структури і підвищення в'язко-пластичних характеристик (KCV, K_{1C}, δ_C) металу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Арчаков Ю.И. Водородная коррозия стали / Киев: Гостехлит, 1985.-192 с.
2. Василенко И.И., Мелехов Р.К. Коррозионное растрескивание сталей// Киев: Наукова думка, 1987. -265 с.
3. Василенко И.И., Шульте О.Ю., Радкевич О.И. Влияние химического состава и технологии производства стали на их склонность к водородному охрупчиванию и сероводородному растрескиванию // Физ.-хим. механика материалов. -1930. -№4. -С. 8-22.
4. Карпенко Г.В., Василенко И.И. Коррозионное растрескивание сталей // Киев: Техника, 1981. – 191 с.
5. Ицкович Г.М. Применение РЗМ для регулирования состава и морфологии неметаллических включений, раскисленной алюминием // Киев Наукова думка, 1987.- 60 с.
6. Панасюк В.В. Предельное равновесие хрупких тел с трещинами // Киев: Наукова думка, 1988. – 246 с.
7. Мешков Ю.Я., Пахаренко Г.А. Структура металла и хрупкость стальных изделий // Киев: Наукова думка, 1985. – 265 с.
8. Михайлов Г.Г. Термодинамика процесс комплексного раскисления сталей//Физико-химические основы производства стали/ Киев: Металлургия, 1981. – С. 101-138.
9. Подгаецкий В.В. Неметаллические включения в сварных швах //Киев: Машгиз, 1982, – 85 с
10. Карпенко Г.В., Крипякевич Р.И. Влияние водорода на свойства стали // Киев: Наукова думка, 1982. -200 с.
11. Карпенко Г.В., Василенко И.И. Коррозионное растрескивание // Киев: Техника, 1981. - 191 с.
12. Панасюк В.В. Механика квазихрупкого разрушения материалов // Киев: Наукова думка, 1981. – 416 с.

13. Самойленко М.І. Функціональна надійність трубопроводів транспортних систем // –Х.:ХНАМГ. -2009.-184 с.
14. Ориняк І.В., Різгонюк В.В. Ресурс довговічність і надійність трубопроводів. Огляд сучасних підходів і проблеми нормативного забезпечення в Україні // Нафтова і газова промисловість. - 2003.-№4.-С. 54-57.
15. Радкевич О.І., Похмурский В.В. Влияние сероводорода на работоспособность материалов оборудования газодобывающей промышленности // Физ.-хим. механика материалов. - 2000.-№2.- С. 93-97.
16. Гриднев В.Н., Гаврилюк В.Г., Мешков Ю.Я. Прочность и пластичность холоднодеформированной стали Киев Наукова думка 1974 – 232 с.
17. Мешков Ю.Я. О возможности устойчивого равновесия острых трещин при их зарождении в металлах // Metallofizika. -1989.–Вып.23.-С. 5-12.
18. Писаренко Г.С., Стрижало В.А. Экспериментальные методы в механике деформируемого твердого тела // Киев: Наукова думка. -1986.-262 с.
19. Сварные строительные конструкции: В 3-х томах. Т.1. Основы проектирования конструкций/ Л.М.Лобанов, В.И. Махненко, В.И. Труфяков и др. / Под ред. Л.М.Лобанова // Киев: Наукова думка, 1993. – 416 с.
20. Макаренко В.Д., Гоц В.І., Савенко В.І. і ін. Експериментальні дослідження кінетики росту тріщин та несучої здатності трубних сталей підземних систем водовідведення // Strength of Materials and Theory of Structures , 2023.- №110.-С. 469-482.
21. Прочность и акустическая эмиссия материалов и элементов конструкций/ Под ред. акад. Г.С. Писаренко // Киев: Наукова думка, 1991. – 229 с.
22. Оксана Бердник, Валерій Макаренко, Наталія Амеліна. Дослідження взаємозв'язку між межею міцності і тривалою втомленістю сталевій арматури залізобетонних конструкцій тривалого терміну експлуатації в агресивних середовищах // Збірник наукових праць, Випуск 14: Бідвельні конструкції. Теорія і практика, 2024, С. 125-134; DOI:10.32347/2522-4182.14.2024.125-134; УДКБ 14.842
23. Валерій Макаренко, Володимир Гоц, Юлія Макаренко, Тетяна Аргатенко. Експериментальні дослідження несучої здатності трубних сталей систем водовідведення // Науково-технічний збірник. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. Вип. 47, 2024.- С. 35-46.
24. Макаренко В.Д., Гоц В.І., Аргатенко Т.В., Винников Ю.І., Максимов С.Ю., Макаренко Ю.В. Дослідження впливу структурно-фазового складу трубних сталей газопроводів на спротив динамічному навантаженню в корозійному НАСЕ-середовищі. // 36. наукових праць за матеріалами XVII Міжнародної науково-практичної конференції (12-13 грудня 2024р). Наукове видання: “Академічна й університетська наука: результати та перспективи” / Вид-во нац. університета “Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка”.
25. Макаренко В.Д., Палий Р.В., Галиченко Е.Н. и др. Физико-механические основы сероводородного коррозионного разрушения промышленных трубопроводов // Киев: Наукова думка, 2002. -412 с.

REFERENCES

1. Archakov Yu.I. Vodorodnaya korozhiya stali (Hydrogen corrosion of steel). Kiev: Gostekhlit, 1985. – 192 p.
2. Vasilenko I.I., Melekhov R.K. Korrozionnoe rastreskivanie stali (Corrosion cracking of steels). Kiev: Naukova dumka, 1987. – 265 p.
3. Vasilenko I.I., Shulte O.Yu., Radkevich O.I. Vliyanie khimicheskogo sostava i tekhnologii proizvodstva stali na ikh sklonnost k vodorodnomu okhrupchivaniyu i serovodorodnomu rastreskivaniyu (Influence of chemical composition and steel production technology on susceptibility to hydrogen embrittlement and hydrogen sulfide cracking). Fiz.-khim. mekhanika materialov, 1930, No. 4, pp. 8–22.
4. Karpenko G.V., Vasilenko I.I. Korrozionnoe rastreskivanie stali (Corrosion cracking of steels). Kiev: Tekhnika, 1981. – 191 p.
5. Itskovich G.M. Primenenie RZM dlya regulirovaniya sostava i morfologii nemetalleskikh vkluchenii, raskislennykh alyuminiem (Application of rare earth metals for controlling composition and morphology of non-metallic inclusions in aluminum-deoxidized steel). Kiev: Naukova dumka, 1987. – 60 p.
6. Panasyuk V.V. Predelnoe ravnesie khрупkikh tel s treshchinami (Limit equilibrium of brittle bodies with cracks). Kiev: Naukova dumka, 1988. – 246 p.
7. Meshkov Yu.Ya., Pakhareno G.A. Struktura metalla i khрупkost stalnykh izdelii (Metal structure and brittleness of steel products). Kiev: Naukova dumka, 1985. – 265 p.
8. Mikhailov G.G. Termodinamika protsessa kompleksnogo raskisleniya stali (Thermodynamics of complex deoxidation of steels). In: Fiziko-khimicheskie osnovy proizvodstva stali (Physico-chemical foundations of steel production). Kiev: Metallurgiya, 1981, pp. 101–138.
9. Podgaetskii V.V. Nemetallicheskie vklucheniya v svarnykh shvakh (Non-metallic inclusions in welded joints). Kiev: Mashgiz, 1982. – 85 p.
10. Karpenko G.V., Kripyakevich R.I. Vliyanie vodoroda na svoistva stali (Effect of hydrogen on steel properties). Kiev: Naukova dumka, 1982. – 200 p.
11. Karpenko G.V., Vasilenko I.I. Korrozionnoe rastreskivanie (Corrosion cracking). Kiev: Tekhnika, 1981. – 191 p.
12. Panasyuk V.V. Mekhanika kvazikhрупkogo razrusheniya materialov (Mechanics of quasi-brittle fracture of materials). Kiev: Naukova dumka, 1981. – 416 p.
13. Samoilenko M.I. Funktsionalna nadiinist truboprovodiv transportnykh system (Functional reliability of pipeline transport systems). Kharkiv: KhNAMH, 2009. – 184 p.
14. Orynyak I.V., Rizgonyuk V.V. Resurs, dovhovichnist i nadiinist truboprovodiv. Ohliad suchasnykh pidkhodiv i problemy normatyvnoho zabezpechennia v Ukraini (Service life, durability and reliability of pipelines: review of modern approaches and regulatory issues in Ukraine). Naftova i hazova promyslovist, 2003, No. 4, pp. 54–57.

15. Radkevich O.I., Pokhmurskii V.V. Vliyanie serovodoroda na rabotosposobnost materialov oborudovaniya gazodobyvayushchei promyshlennosti (Effect of hydrogen sulfide on performance of materials in gas production equipment). Fiz.-khim. mekhanika materialov, 2000, No. 2, pp. 93–97.
16. Gridnev V.N., Gavriilyuk V.G., Meshkov Yu.Ya. Prochnost i plastichnost kholododeformirovannoi stali (Strength and ductility of cold-deformed steel). Kiev: Naukova dumka, 1974. – 232 p.
17. Meshkov Yu.Ya. O vozmozhnosti ustoychivogo ravnovesiya ostrykh treshchin pri ikh zarozhdenii v metallakh (On the possibility of stable equilibrium of sharp cracks during their initiation in metals). Metallofizika, 1989, Iss. 23, pp. 5–12.
18. Pisarenko G.S., Strizhalo V.A. Eksperimentalnye metody v mekhanike deformiruемого tverdogo tela (Experimental methods in mechanics of deformable solids). Kiev: Naukova dumka, 1986. – 262 p.
19. Svarnye stroitelnye konstruksii: V 3-kh tomakh. T.1. Osnovy proektirovaniya konstruksii (Welded building structures: in 3 volumes. Vol. 1. Fundamentals of structural design) / L.M. Lobanov et al. Kiev: Naukova dumka, 1993. – 416 p.
20. Makarenko V.D., Hots V.I., Savenko V.I. et al. Eksperymentalni doslidzhennia kinetyky rostu trishchyn ta nesuchoi zdatnosti trubnykh staley pidzemnykh system vodovidvedennia (Experimental study of crack growth kinetics and load-bearing capacity of pipeline steels in underground drainage systems). Strength of Materials and Theory of Structures, 2023, No. 110, pp. 469–482.
21. Prochnost i akusticheskaya emissiya materialov i elementov konstruksii (Strength and acoustic emission of materials and structural elements) / Ed. G.S. Pisarenko. Kiev: Naukova dumka, 1991. – 229 p.
22. Berdnyk O., Makarenko V., Amelina N. Doslidzhennia vziaimozv'iazku mizh mezheiu mitsnosti i tryvaloio v tomenistiu stalevoi armatury zalizobetonnykh konstruksii (Study of the relationship between ultimate strength and long-term fatigue of steel reinforcement in reinforced concrete structures). 2024, pp. 125–134.
23. Makarenko V., Hots V., Makarenko Yu., Arhatenko T. Eksperymentalni doslidzhennia nesuchoi zdatnosti trubnykh staley system vodovidvedennia (Experimental study of load-bearing capacity of pipeline steels in drainage systems). 2024, pp. 35–46.
24. Makarenko V.D. et al. Doslidzhennia vplyvu strukturno-fazovoho skladu trubnykh staley hazoprovodiv na sprotyv dynamichnomu navantazhenniu v korozijnomu NACE-seredovyshechi (Study of the influence of structural-phase composition of pipeline steels on resistance to dynamic loading in corrosive NACE environment). Poltava, 2024.
25. Makarenko V.D., Palii R.V., Galichenko E.N. et al. Fiziko-mekhanicheskie osnovy serovodorodnogo korrozionnogo razrusheniya promyslovyykh truboprovodov (Physico-mechanical fundamentals of hydrogen sulfide corrosion failure of industrial pipelines). Kiev: Naukova dumka, 2002. – 412 p.

Стаття надійшла 02.03.2026

Макаренко В.Д., Гоц В.І., Ластівка О.В., Томін О.О.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РІДКОЗЕМЕЛЬНИХ І ЛУЖНО-ЗЕМЕЛЬНИХ МІКРОДОБАВОК НА В'ЯЗКО-ПЛАСТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ І КРИХКУ МІЦНІСТЬ ХОЛОДОСТІЙКОЇ НИЗЬКОЛЕГОВАНОЇ СТАЛІ

Встановлено, що одним із найбільш ефективних додаткових резервів підвищення деформаційної здатності та тріщиностійкості металу труб при статичних і циклічних навантаженнях є економічне модифікування мікродобавками, які містять рідкоземельні та лужноземельні елементи або їх сполуки. Особливо це важливо в умовах, коли повністю вичерпано ресурс підвищення механічних і в'язкопластичних характеристик традиційно застосовуваними легувальними елементами, такими як нікель, молібден, титан, ванадій, ніобій тощо.

Разом з тим легування металу труб зазначеними елементами часто не забезпечує високих і стабільних значень механічних властивостей, особливо за умов експлуатації трубопроводів в агресивно-корозійних середовищах нафтогазових родовищ України. За наявності знайомих навантажень ресурс роботи промислових трубопроводів у таких умовах істотно скорочується. Так, наприклад, термін служби трубопроводів для закачування стічних вод у свердловини на ряді нафтових родовищ Західної України становить лише 2–3 роки замість запланованих 10–15 років.

Визначено оптимальні концентрації модифікувальних добавок, введення яких у низьколеговану сталь у процесі її виплавки забезпечує істотне підвищення в'язкопластичних характеристик, показників крихкої міцності та тріщиностійкості металу (у %): церій - 0,01–0,03; ітрію - 0,01–0,025; барій - 0,007–0,015; кальцій - 0,001–0,0025; цирконій - 0,02–0,04. Встановлено, що введення модифікувальних добавок у зазначених концентраційних межах сприяє зростанню тріщиностійкості низьколегованої сталі в широкому діапазоні температур - від +20 до –60 °С.

Показано контролюючу роль неметалевих включень глобулярної форми (переважно оксидів та окисульфідів) у процесі крихкого руйнування холодостійких сталей, економічно легованих Ni, Mo, V і Nb. Такі включення сприяють подрібненню мікроструктури, а рідкоземельні, лужноземельні елементи та цирконій, крім того, впливають на формування частинок другої фази - неметалевих включень. Вважається, що неметалеві включення є джерелами зародження субмікротріщин на межах зерен, обмежуючи тим самим зростання запасу в'язкості металу. Встановлено, що наявність зазначених неметалевих включень не дозволяє повною мірою реалізувати сприятливий вплив нікелю, молібдену та ванадію на рівень крихкої міцності, незважаючи на подрібнення зерна структури та підвищення в'язкопластичних характеристик металу (KCV, K₁C, δC).

Ключові слова: тріщиностійкість, воднева крихкість, корозійне розтріскування, мікролегування, рідкоземельні елементи.

Makarenko V.D., Hots V.I., Lastivka O.V., Tomin O.O.

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF RARE-EARTH AND ALKALINE-EARTH MICRO-ADDITIONS ON THE VISCO-PLASTIC PROPERTIES AND BRITTLE STRENGTH OF COLD-RESISTANT LOW-ALLOY STEEL

It has been established that one of the most effective additional reserves for improving the deformation capacity and fracture toughness of pipe steel under static and cyclic loading is cost-effective modification by microadditions containing rare-earth and alkaline-earth elements or their compounds. This approach is especially important when the potential for improving mechanical and viscoplastic properties by traditionally used alloying elements, such as nickel, molybdenum, titanium, vanadium, niobium, etc., has been fully exhausted.

At the same time, alloying pipe steels with these elements often fails to ensure high and stable mechanical properties, particularly under operating conditions in aggressive corrosive environments of oil and gas fields in Ukraine. Under alternating loading conditions, the service life of industrial pipelines in such environments is significantly reduced. For example, the service life of pipelines used for wastewater injection into wells at several oil fields in Western Ukraine is only 2–3 years instead of the planned 10–15 years.

Optimal concentrations of modifying additions have been determined, the introduction of which into low-alloy steel during the melting process leads to a significant increase in viscoplastic properties, brittle strength, and fracture toughness of the metal (in wt.%): cerium – 0.01–0.03; yttrium – 0.01–0.025; barium – 0.007–0.015; calcium – 0.001–0.0025; zirconium – 0.02–0.04. It has been established that the introduction of modifying additions within the specified concentration ranges promotes an increase in the fracture toughness of low-alloy steel over a wide temperature range from +20 to –60 °C.

The controlling role of globular non-metallic inclusions (mainly oxides and oxysulfides) in the process of brittle fracture of cold-resistant steels economically alloyed with Ni, Mo, V, and Nb has been demonstrated. Such inclusions contribute to microstructural refinement, while rare-earth and alkaline-earth elements, as well as zirconium, additionally influence the formation of second-phase particles, namely non-metallic inclusions. Non-metallic inclusions are considered to be sources of submicrocrack initiation at grain boundaries, thereby limiting the increase in the metal's toughness reserve. It has been established that the presence of the above-mentioned non-metallic inclusions prevents the full realization of the beneficial effect of nickel, molybdenum, and vanadium on the level of brittle strength, despite grain refinement and an increase in the viscoplastic characteristics of the metal (KCV, K_{IC} , δC).

Keywords: fracture toughness, hydrogen embrittlement, corrosion cracking, microalloying, rare earth elements, crack growth kinetics.

УДК 621.791.11.682

Макаренко В.Д., Гоць В.І., Ластівка О.В., Томін О.О. Дослідження впливу рідкісноземельних і лужноземельних мікродобавок на в'язко-пластичні властивості і крихку міцність холодостійкої низьколегованої сталі // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2026. – Вип. 116. – С. 521-530. Іл. 9. Бібліогр. 25 назв.

UDC 621.791.11.682

Makarenko V.D., Hots V.I., Lastivka O.V., Tomin O.O. Research on the influence of rare-earth and alkaline-earth micro-additions on the visco-plastic properties and brittle strength of cold-resistant low-alloy steel // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles. – K.: KNUCA, 2026. – Issue 116. – P. 521-530. Fig. 9. Ref. 25.

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор кафедри технології будівельних констукцій і виробів КНУБА, МАКАРЕНКО Валерій Дмитрович
Адреса: 03680 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, КНУБА
E-mail: green555tree@gmail.com
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9178-9657>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор кафедри технології будівельних констукцій і виробів КНУБА, ГОЦ Володимир Іванович
Адреса: 03680 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, КНУБА
E-mail: gots.vi@knuba.edu.ua
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7702-1609>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор кафедри технології будівельних констукцій і виробів КНУБА, ЛАСТІВКА Олександр Васильович
Адреса: 03680 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, КНУБА
E-mail: lastivka.ov@knuba.edu.ua
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3670-0020>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): доктор філософії, доцент кафедри технології будівельних констукцій і виробів КНУБА, ТОМІН Олександр Олегович
Адреса: 03680 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, КНУБА
E-mail: alexkp94@gmail.com
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2830-9419>