

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА»
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КИЇВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА
«КІП» ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО
УКРАЇНСЬКА АКАДЕМІЯ НАУК
АКАДЕМІЯ БУДІВНИЦТВА УКРАЇНИ

*Нашим Учителям та колегам вченим,
інженерам і будівельникам
присвячується*

**В.Д. МАКАРЕНКО, В.І. САВЕНКО, О.Е. ЧИГИРИНЕЦЬ,
Ю.Л. ВИННИКОВ, Ю.В. МАКАРЕНКО**

РІДКОЗЕМЕЛЬНІ МЕТАЛИ – СТРАТЕГІЧНИЙ РЕЗЕРВ РОЗВИТКУ ЕКОНОМІКИ УКРАЇНИ



МОНОГРАФІЯ

КИЇВ
Видавництво Ліра-К
2026

Рецензенти:

Зезекало І.Г. – професор, доктор технічних наук, професор національного університету «Полтавська політехніка імкени Юрія Кондратюка»;

Головач І.В. – професор, доктор технічних наук, професор національного університету біоресурсів і природокористування України;

Кіндрачук М.В. – професор, доктор зав. кафедрою «Машинознавство» національного авіаційного університету, Чл.-кор. національної академії наук Укураїни, Лауреат Державної премії України.

Макаренко В.Д., Савенко В.І., Чигиринець О.Е. та ін.

Р49 Рідкоземельні матеріали (РЗМ) – стратегічний резерв розвитку економіки України : монографія / В.Д. Макаренко, В.І. Савенко, О.Е. Чигиринець та ін. – Київ : Видавництво Ліра-К, 2026. – 140 с.
ISBN 978-617-8936-48-8

В монографії наведені результати теоретичних досліджень і експериментальних випробувань трубних сталей нафтогазопроводів при різних (заводських та польових) умовах експлуатації.. Освітлені перспективи створення надійних і економних труб з корозійно-стійких і холодостійких сталей, економно модифікованих комплексними лігатурами з РЗМ і ЛЗМ, для будівництва потужних трубопроводів та методи підвищення якості зварних з'єднань трубопроводів.

Монографія може бути корисною для студентів, викладачів та фахівців інженерних спеціальностей вищих навчальних закладів освіти будівельного, машинобудівного і нафтогазового профілю.

УДК 338.45:621.643.2-034.14](477)(02)

ISBN 978-617-8936-48-8

© Макаренко В.Д., Савенко В.І.,
Чигиринець О.Е. та ін., 2026
© Видавництво Ліра-К, 2026

З М І С Т

ПЕРЕДМОВА	5
РОЗДІЛ 1. РІДКОЗЕМЕЛЬНІ І ЛУЖНОЗЕМЕЛЬНІ МЕТАЛИ – ДОДАТКОВИЙ РЕЗЕРВ ПОДОВЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО РЕСУРСУ КОНСТРУКЦІЙ ЗВАРНИХ ТРУБ НАФТОГАЗОПРОВОДІВ	9
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЗМ І ЛЗМ НА ВЯЗКОПЛАСТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ І КРИХКУ МІЦНІСТЬ ХОЛОДОСТІЙКОЇ НИЗЬКОЛЕГОВАНОЇ СТАЛІ	31
РОЗДІЛ 3. РІДКОЗЕМЕЛЬНІ І ЛУЖНОЗЕМЕЛЬНІ МЕТАЛИ – ДОДАТКОВИЙ РЕЗЕРВ ЗНИЖЕННЯ ГАЗІВ В НАПЛАВЛЕНОМУ МЕТАЛІ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ТРУБ НАФТОГАЗОПРОВОДІВ	41
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЗМ І ЛЗМ НА КОРОЗІЙНО-МЕХАНІЧНУ ВТОМЛЕНІСТЬ ТРУБНИХ СТАЛЕЙ, ТРИВАЛИЙ ТЕРМІН ЕКСЛУАТОВАНИХ В ХІМІЧНО-АГРЕСИВНИХ СЕРЕДОВИЩАХ	47
РОЗДІЛ 5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЗМ І ЛЗМ НА ФОРМИ І РОЗМІРІВ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ В ПРОЦЕСІ ВИПЛАВКИ СТАЛІ В ЕЛЕКТРОКОНВЕРТЕРАХ	56
РОЗДІЛ 6. КІНЕТИКА ВИДАЛЕННЯ ВОДНЮ В ПРОЦЕСІ ВИПЛАВКИ ТРУБНОЇ СТАЛІ В МАРТЕНІВСЬКИХ ПІЧАХ І ЕЛЕКТРОКОНВЕРТЕРАХ	62
РОЗДІЛ 7. КІНЕТИКА ДЕСУЛЬФУРАЦІЇ ТРУБНОЇ СТАЛІ ПРИ ВИПЛАВЦІ В ЕЛЕКТРОКОНВЕРТЕРАХ	69
РОЗДІЛ 8. ПРОЦЕСИ РОЗКИСНЕННЯ І КІНЕТИКИ ВИДАЛЕННЯ ВОДНЮ ІЗ ТРУБНОЇ СТАЛІ ПРИ ВИПЛАВЦІ В ЕЛЕКТРОКОНВЕРТЕРАХ	76
РОЗДІЛ 9. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ І РОЗРОБКА ШЛЯХІВ ЗНИЖЕННЯ ВМІСТУ ВОДНЮ В ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ ТРУБОПРОВОДІВ	86
РОЗДІЛ 10. МЕТАЛУРГІЙНІ МЕТОДИ РЕГУЛЮВАННЯ СТРУКТУРОЮ І РОЗПОДІЛОМ ВОДНЮ В ПРОЦЕСІ КРИСТАЛІЗАЦІЇ МЕТАЛУ	96

РОЗДІЛ 11. ФОРМУВАННЯ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ В ПРОЦЕСІ ВИПЛАВКИ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ	105
РОЗДІЛ 12. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕОДНОРІДНОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ І СХИЛЬНОСТІ ДО ВПЛИВУ СЕРЕДОВИЩА ЗА ДОПОМОГОЮ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРОРУХОМОЇ СИЛИ	112
РОЗДІЛ 13. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СПРОТИВУ ЗВАРЮВАНИХ З'ЄДНАНЬ ТРУБНИХ СТАЛЕЙ ГАЗОПРОВОДІВ ЗАРОДЖЕННЮ РУЙНУВАНЬ ПРИ ДИНАМІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ	120
РОЗДІЛ 14. РОЗРАХУНОК НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ КОНСТРУКЦІЙ ЗВАРНИХ ТРУБ НАФТОГАЗОПРОВОДІВ, ЕКСПЛУАТОВАНИХ В АГРЕСИВНИХ СЕРЕДОВИЩАХ.....	128
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	130

Як відомо, в теперішній час традиційні методи легування повністю вичерпали свій ресурс стосовно підвищення корозійно-механічних властивостей, що суттєво обмежують їх резерв для подовження експлуатаційного (безаварійного) ресурсу сталевих конструкцій, зокрема трубопроводів (нафтогазопроводів, водоводів гарячого і холодного водопостачання). Використання рідкоземельних і лужноземельних металів (РЗМ і ЛЗМ) в теперішній час дуже актуально для вирішення проблеми суттєвого підвищення холодостійкості і в'язких характеристик. Враховуючи унікальні термодинамічні властивості рідко-земельних (РЗМ) і лужно-земельних (ЛЗМ) металів, необхідно було провести системні і комплексні експериментальні дослідження для більш конкретного вивчення впливу цих модифікаторів на в'язко-пластичні характеристики на предмет використання їх металургійної переваги для більш ефективного виготовлення труб, які в подальшому використовуються для будівництва нафтогазопроводів та трубопроводів різного призначення. На базі отриманих експериментальних результатів були зроблені наступні висновки: встановлено, що одним з шляхів підвищення крихкої міцності є одночасне роздрібнення зерен структури і неметалевих включень, що досягається економним модифікуванням наплавленого металу РЗЕ, ЛЗЕ і цирконієм. Встановлені оптимальні концентрації модифікуючих добавок (в %), при введенні яких в зварний шов значно підвищуються тріщиностійкість і в'язко-пластичні характеристики (церій 0.01-0.02; ітрій 0.015-0.022; барій 0.0014-0.0025); кальцій 0.0012-0.0020; цирконій 0.031-0.044). Показано, що легування металу шва мікродобавками церію, ітрію, барію і кальцію (ординарне легування) спричиняє, крім роздрібнення структури металу шва і зони термічного впливу, очищення границь зерен від неметалевих включень і інородних фаз, причому зникають сульфідні з'єднання заліза і марганцю великої протяжності, вони приймають глобулярну форму при одночасному зменшенні їх кількості. Запропоновані математичні моделі численого прогнозування тріщиностійкості зварних з'єднань, експлуатованих в агресивних середовищах під напруженнями, які можуть використовуватися для інженерних розрахунків і прогнозних оцінок стійкості проти крихкого руйнування зварних металоконструкцій нафтогазових об'єктів.

Встановлено, що найбільш ефективним способом – одним із додаткових резервів підвищення деформаційної здатності тріщиностійкості металу труб при статичних і циклічних навантаженнях є економне модифікування його мікродобавками, які містять рідкоземельні і лужно-земельні 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, легуваннями ними металу труб зачасту не забезпечує високих і стабільних значень механічних властивостей, особливо коли трубопроводи

експлуатуються в агресивно-корозійних середовищах нафтогазових родовищ України. В таких умовах експлуатації промислові трубопроводи при наявності знакозмінних навантажень ресурс роботи їх скорочується. Так, наприклад, термін служби трубопроводів для закачування в свердловини сточних вод на ряді нафтових родовищах Західної України складає 2-3 роки замість запланованих 10-15 років. 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; 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). Встановлена контролююча роль неметалевих включень глобулярної форми (як правило, оксиди і оксисульфідів) в процесі крихкого руйнування холодостійкої сталі, економно легованої Ni, Mo, V, Nb, які сприяють роздрібненню мікроструктури, а РЗЕ, 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. 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 (K_{CV} , K_{1C} , δ_C) металу.

Відомо, що в теперішній час традиційні методи легування повністю вичерпали свій ресурс стосовно підвищення корозійно-механічних властивостей, що суттєво обмежують їх резерв для подовження експлуатаційного (безаварійного) ресурсу сталевих конструкцій, зокрема трубопроводів. Використання рідко-земельних і лужно-земельних металів (РЗМ і ЛЗМ) в теперішній час дуже актуально, про що засвідчують підписані договори між Україною і США щодо спільного освоєння родовищ, які знаходяться на території України (розробки родовищ багатих на рідко-земельні метали – РЗМ і лужно-земельні метали – ЛЗМ) і їх спільне використання на бартерній основі, зокрема США передають Україні озброєння для потреб ЗСУ, а Україна передає родовища РЗМ і ЛЗМ США для розробки і використання, тобто тим самим РЗМ і ЛЗМ грають роль додаткового резерву для досягнення оборонної і економічної безпеки України.. А тому комплексні модифікатори у вигляді лігатур з РЗМ і ЛЗМ мають одночасно з нуковим інтересом, ще й стратегічно-політичну ціль. Слід відмітити, що цінність РЗМ і ЛЗМ з металургійної і металографічної точки зору полягає в наступному. Ефективність впливу таких добавок пов'язана із зміною морфології, розподілення і дисперсності структурних складових металу, а також неметалевих включень, що дозволяє в підсумку регулювати структурно-фазовий склад металу і його вторинну фазу і стан границь зерен. Проведені комплексні експериментальні дослідження в даній роботі дозволили обґрунтувати оптимальний склад лігатур з РЗМ і

ЛЗМ і їх дисперсний склад. Детально розглянуто питання впливу комплексних лігатур з РЗМ і ЛЗМ на вміст газів (водню, кисню і азоту), які, як правило, завжди негативно впливають на цілий комплекс механічних, корозійних властивостей металу, який тривалий час експлуатується в корозійно-активних середовищах.

Слід відмітити, що цінність РЗМ і ЛЗМ з металургійної і металографічної точки зору полягає в наступному. Аналіз літературних джерел свідчить, що питання впливу РЗМ і ЛЗМ на втомлену міцність, особливо в умовах активного впливу корозійного середовища майже не вивчені чи недостатньо для повного розуміння механізмів впливу міцкомодифікаторів на процес руйнування трубних сталей при одночасній дії такого середовища та знакозмінному навантаженні. Ефективність впливу таких добавок пов'язана із зміною морфології, розподілення і дисперсності структурних складових металу, а також неметалевих включень, що дозволяє в підсумку регулювати структурно-фазовий склад металу і його вторинну фазу і стан границь зерен. Проведені комплексні експериментальні дослідження в даній роботі дозволили обґрунтувати оптимальний склад лігатур з РЗМ і ЛЗМ і їх дисперсний склад. Детально розглянуто питання впливу комплексних лігатур з РЗМ і ЛЗМ на вміст газів (водню, кисню і азоту), які, як правило, завжди негативно впливають на цілий комплекс механічних, корозійних властивостей металу, який тривалий час експлуатується в корозійно-активних середовищах. Враховуючи вищевикладене, нами були проведені комплексні експериментальні дослідження впливу РЗМ і ЛЗМ на корозійно-втомлену міцність трубних сталей під дією багатоциклових навантажень.

В даній роботі уперше експериментально і теоретично досліджені способи регулювання форми, розмірів і структури неметалевих включень в процесі виплавки трубних марок сталей в мартеновських пічах і електроконвертерах в промислових (заводських) умовах. Детально розглянуті питання металургійних методів регулювання процесом реформування неметалевих включень, що сприяє підвищенню механічних і технологічних властивостей сталі при виплавці в електроконвертерах, що послужило підґрунтям для отримання в промислових масштабах дрібнозернистих холодостійких сталей металургійним шляхом. Регулювання якості сталей з глибокою ступінною розкислення дозволяє значно підвищити механічні характеристики трубої сталі, що сприяє подовженню ресурсу трубних конструкцій, які експлуатуються в суворих природньо-кліматичних і інженерно-геологічних умовах на території України. Встановлено, що зменшення неметалевих оксидних і окисульфідних неметалевих включень в металі в процесі виплавки сталі в мартеновських пічах і конвертерах відбувається із застосуванням основних шлаків при виливці сталі в ковш, де додатково розплавлений метал обробляється феросплавами алюмінію, марганцю і кремнію. Це допускає зниження кількості крупних НВ в сталі, а також сприяє їх роздрібненню. Роль таких модифікуючих домішок можуть грати, як показано в роботі, рідкоземельні метали, які вводили в метал (церій, лантан, ітрій і ін.). Вони володіють високою спорідненіс-

тю до кисню і сірки та можуть зв'язувати їх ще в рідкій сталі до початку кристалізації. Ці неметалеві включення видаляються із металу в результаті переносу з потоками рідкої сталі до міжфазних поверхностей, де вони затримуються в процесі кристалізації.

В даній роботі уперше експериментально і теоретично досліджена кінетика видалення водню в процесі виплавки трубних марок сталей в мартеновських пічах і електроконвертерах в промислових (заводських) умовах. Детально розглянуті питання металургійних методів регулювання процесом видалення водню із сталі при виплавці в електроконвертерах, що послужило підґрунтям для отримання в промислових масштабах низько водневих (холодостійких) статей металургійним шляхом. Низьководнева сталь з глибокою ступінню обезводнення дозволяє значно підвищити механічні характеристики трубної сталі, що сприяє подовженню ресурсу трубних конструкцій, які експлуатуються в сурових природньо-кліматичних і інженерно-геологічних умовах на території України. Встановлено, що видалення водню із металу в процесі виплавки сталі в мартеновських пічах і конвертерах відбувається із застосуванням основних шлаків при виливці сталі в ковш, де додатково розплавлений метал обробляється феросплавами марганцю і кремнію. Це допускає зниження водню в сталі до низьких концентрацій ($H < 2 - 4 \text{ см}^3/100\text{г}$). Роль обезводнювачів рідкої сталі можуть грати, як показано в роботі, рідкоземельні метали, які вводили в метал (церій, лантан, ітрій і ін.). Вони володіють високою спорідненістю до водню і зв'язують його в гідриди ще в рідкій сталі до початку кристалізації. Ці неметалеві включення видаляються із металу в результаті переносу з потоками рідкої сталі до міжфазних поверхностей, де вони затримуються в процесі кристалізації.

У зв'язку з цим, була поставлена задача розробки конкурентоздатної вітчизняної технології виробництва труб з низьковуглецевих економномодифікованих сталей з високою гарантованою корозійною стійкістю в окисних середовищах (швидкості корозії в середовищі НАСЕ не повинні перевищувати 0,10-0,15 мм/рік) і механічними властивостями замість імпорتنих сталевих труб. В монографії представлена мікроструктура гарячodeформованих труб після термічної обробки, виготовлених із економномодифікованих сталей.

Основні дослідження проведені в науково-виробничому центрі «Ресурс» (Тюменська область); Інституті електрозварювання ім.Є.О.Патона НАНУ та його науково-експериментальних підрозділах (м.Київ), Київському національному університеті будівництва і архітектури (КНУБА) та Приазовського технічного університету (м.Маріуполь) в рамках науково-технічних проектів та творчих договорів. Виплавку сталей з різними системами економної модифікації проводили на металургійному заводі «Азовсталь» (м.Маріуполь) під керівництвом академіка НАНУ Чигарева В.В. і академіка Європейської академії наук і кваліфікованого спеціаліста в металургії Ломакіна В.М.

АВТОРСЬКИЙ КОЛЕКТИВ

Макапенко Валерій Дмитрович – професор Київського національного університету будівництва і архітектури професор, доктор технічних наук

Савенко Володимир Іванович – професор Київського Національного університету будівництва і архітектури, доктор технічних наук (ФРН), академік Академії будівництва УКРАЇНИ, Лауреат державної премії України з науки і техніки;

Чигиринець Олена Едуардівна – професор, доктор технічних наук Київська політехніка імені Ігоря Сікорського;

Винников Юрій Леонідович – професор, доктор технічних наук
«Полтавська політехніка»;

Макаренко Юлія Валеріївна – магістерка університету «Манітобо»
(м.Вінніпег, Канада)

РІДКОЗЕМЕЛЬНІ МЕТАЛИ – СТРАТЕГІЧНИЙ РЕЗЕРВ РОЗВИТКУ ЕКОНОМІКИ УКРАЇНИ

МОНОГРАФІЯ