

УДК 624.017

ДОСЛІДЖЕННЯ, ОЦІНКА І ПІДВИЩЕННЯ МІЦНОСТІ СТАЛЕЙ ТА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ІННОВАЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ В БУДІВНИЦТВІ

В.Д. Макаренко¹,

д-р техн. наук, професор

В.І. Савенко¹,

д-р техн. наук, (ФРН), професор

Ю.В. Макаренко²,

магістерка

І.С. Нестеренко¹,

канд. техн. наук, доцент

Д.Я. Кислюк³,

канд. техн. наук, доцент

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

²Університет "Манітоба", м. Вінніпег, Канада

³Луцький національний технічний університет

DOI: 10.32347/2410-2547.2025.115.262-270

Наведені результати комплексних досліджень мікрomodифікованих сталей (сім марок), легованих ванадієм, хромом, церієм, нікелем, молібденом, ніобієм. Високоякісні металеві матеріали, мікрomodифіковані ультра дисперсними порошками можуть використовуватись для створення виробів чи будівельних конструкцій нового покоління, визначаються високою ефективністю та рівнем витрат на такі сталі (сплави).

Ключові слова: економічна ефективність, легування, модифікатори, ультра дисперсні порошки, тріщиностійкість, довговічність.

Відомо [1-14], що в багатьох країнах світу проводяться інтенсивні експериментальні і теоретичні дослідження щодо створення арматурної сталі нового покоління – з високими в'язкопластичними і міцнісними властивостями, які мають унікальними характеристиками, зокрема високою корозійною тріщиностійкістю в процесі довготривалого терміну експлуатації в корозійно-агресивних середовищах. Бажаний рівень властивостей, необхідний для забезпечення тривалої живучості залізобетонних конструкцій, може досягатися завдяки економічному легуванню сталей модифікаторами типу ніобію, церію, ванадію, алюмінію та відповідного режиму її термо-механічної обробки в процесі гарячої прокатки субмікроструктурного стану арматурної сталі. До таких сталей, відповідно прийнятої термінології, відносяться полікристалічні матеріали із середнім розміром зерен і інших структурних одиниць розміром близько 100-200 мкм до 0.1 мм, при об'ємній частці таких одиниць не менше 40-50%. Крім того, бал зерна по ГОСТ 639-82 не менше 10-12, а також частка в'язкої складової після руйнувань зразків при температурі -50°C повинна перевищувати 50-60% (див. табл. 1-10).

Основні області застосування конструкційних легованих мікрomodифікаторами сталей в будівельній галузі - виготовлення мостових конструкцій, опорних стінок і трубопроводів каналізаційних систем, виготовлення нафтогазопроводів і водоводів гарячого водопостачання, арматурних стрижнів, які відіграють роль силових елементів залізобетону.

Ефект від використання таких матеріалів виражається в економії матеріалів, так як значно підвищується термін експлуатації і живучість залізобетонних конструкцій, послаблюються навантаження та негативні впливи на навколишнє середовище, підвищуються показники експлуатаційних властивостей в 2-3 рази.

Слід зазначити, що вітчизняний рівень науково-технологічних розробок в металургійній галузі, зайнятий виробництвом економно-модифікованих сталей, відповідає світовому, а в деяких випадках і перевищує його. Дослідження по даній проблемі проводяться в рамках академічних інститутів, частково ВНЗ, входять окремими розділами в галузеві програми, але, як правило, не закінчуються практичним впровадженням результатів, зокрема, на будівельних майданчиках.

В останні роки намітилася певні успіхи в практичній реалізації наукових досліджень.

Так, спільними зусиллями вчених КНУБА і Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ і спеціалістів з металургії м. Череповця на виробничих площах АК “Северсталь” були проведені системні і комплексні дослідження мікромодифікованих сталей (сім марок), легованих ванадієм, хромом, церієм, нікелем, молібденом, ніобієм, з яких були виготовлені на прокатному стані арматурні стрижні діаметром 22 мм. Після цього стрижні були піддані термічній обробці для отримання різних структур, зокрема, ферито-перлітної, перлітної, структур неповного перетворення аустеніту (бейнітного перетворення) – структури сорбіту та троститу, а також мартенситу. Після цього з арматурних стрижнів готовилися зразки для випробувань на втомлену міцність (втомленість), статичні механічні властивості {межа міцності σ_B (МПа), межа текучості σ_T (МПа), відносне подовження – δ (%), поперечне звуження – ψ (%)}, а також критерії сучасної механіки руйнування $\{K_{IC}, \text{МПа}\cdot\text{м}^{1/2}, \delta_{C, \text{мм}}, R_{MC}, \text{МПа}\}$. Крім того, визначали показники швидкості корозії в корозійно-агресивних середовищах, які містили хлорид-іони, CO_2 , аніони сірчистої кислоти, а також в бактеріальних модельних середовищах з бактеріями виду СВБ, ГТБ і ЗБ.

Таблиця 1

Хімічний склад сталей 10ХСНДА і 15ХСНДА

Марка сталі	Масова частка елементів, %						
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Nb
10ХСНДА	≤ 0.12	0.8-1.2	0.08-0.98	0.32-0.62	0.22-0.63	0.38-0.58	0.28-0.58
15ХСНДА	0.1-0.15	0.4-0.75	0.62-0.89	0.32-0.58	0.22-0.51	0.21-0.39	0.03-0.58

Примітка: масова частка S і P < 0.010-0.015%; азоту до 0.012%. Допускається домішка ніобію і ванадію в кількості 0.08-0.12%.

Таблиця 2

Механічні властивості прокату із сталей 10ХСНДА і 15ХСНДА

Марка сталі	σ_T , Н/мм ²	σ_B , Н/мм ²	Відносне подовження, %	Ударна в'язкість, RCU, Дж/см ²	
				+20°C	-40°C
10ХСНДА	422-500	560-650	$\geq 21-24$	70	54
15ХСНДА	390-495	520-630	$\geq 22-25$	68	56

Таблиця 3

Фізичні характеристики α -фази

Назва	Фізичні характеристики фази α -Fe		
	Період кристалічної решітки, нм	Щільність дислокацій $\rho \cdot 10^9, \text{см}^{-2}$	Викривлення решітки, см^{-1}
10ХСНДА	0.28683	1.57-2.17	440-535
15ХСНДА	0.28723	1.7-2.23	557-638
Табличне значення α -Fe	0.28664	-	-

Випробування на розтягування (ГОСТ1497-88) зразків типу “гагаріки” проводили на установці моделі “Інстрон” (Великобританія).

Ударну в'язкість визначали згідно ГОСТу9454-88, а твердість по ГОСТ9012-89.

Таблиця 4

Механічні характеристики сталей

Марка сталі	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %	KCV (Дж/см ²) при температурі $t = -40^\circ\text{C}$
15ХСНДА	420	556	32	33
10ХСНДА	395	515	29	38
16Г2АФ	446	595	28	39
06Г2Б	450	605	24	44

Таблиця 5

Вміст сірки в сталях

Марка сталі	Вміст сірки, %
15ХСНДА	0.03
10ХСНДА	0.032
16Г2АФ	0.021
06Г2Б	0.012
08ХМЧА	0.005-0.01

Таблиця 6

Механічні характеристик і критерії тріщиностійкості сталі 09Г2ФБ

Хімічний склад сталі 09Г2ФБ, %	σ_B , Мпа	$\sigma_{0.2}$, Мпа	δ_C , %	KCV, МДж/м ²		K_{IC} , МПа·м ^{1/2}		δ_C , мм	
				-40°C	-20°C	+20° C	-20°C	+20° C	-20°C
C=0.13; Mn 1.7-1.9; Si 0.35-0.40; V=0.09-0.1; Nb=0.05-0.07; S, P =0.01-0.02	560	435	19-22	0.6- 0.7	0.8	98.5- 102.3	90- 95.4	0.7- 0.75	0.47- 0.52

В табл. 7 наведені дані гарячекатаної сталі марки 09Г2ФБ, з якої були виготовлені на прокатному стані арматурні стрижні для експериментальних випробувань.

Хімічний склад вуглецевої сталі марки 20 наступний: C0.17-0.24; Mn0.25-0.65; Si0.17-0.37; P0.036; S0.04.

Нормативний і фактичний склад і механічні властивості сталі 16Г2АФ наведені в табл. 8.

Таблиця 7

Ударна в'язкість сталі 09Г2ФБ

Ударна в'язкість і волокно в зломі			
по Менаже		по Шарпі	
KCV, МДж/м ²	B, %	KCV, МДж/м ²	B, %
0.84-1.35	50-70	0.52-1.1	35-75
0.26-0.94	5-20	0.10-0.35	10-15
0.12-0.64	0	0.12-0.50	0

В табл. 10 наведені дані експериментальних випробувань дослідних сталей з визначення критеріїв тріщиностійкості, взятих із сучасної механіки руйнувань – параметри спротиву крихкому руйнуванню K_{IC} і δ_C та параметр мікровідколу R_{MC} , які чутливі до структури металу, яка змінюється в процесі тривалого терміну експлуатації в агресивному середовищі.

Таблиця 8

Хімічний склад 16Г2АФ

C	Mn	Si	V	N	S	P	Al
Фактичний (в стані поставки)							
0.13-0.15	1.6-1.66	0.32-0.40	0.061-0.095	0.011-0.013	0.012-0.022-	0.01-0.014	0.004-0.026
Вимоги ТУ14-3-1138-82							
0.11-0.17	1.1-1.70	0.20-0.40	0.06-0.10	0.010-0.020	0.020	0.025	0.015-0.050

Таблиця 9

Механічні властивості сталі 16Г2АФ

σ_B , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %	KCV ₀ , МДж/м ²	KCU ₄₀ , МДж/м ²	В при 0°C, %
Фактичні					
566-601	400-460	21-27	0.48-0.73	0.49-0.65	25-90
Вимоги ТУ					
540-640	370-470	≥19	≥0.4	≥0.5	≥60

Таблиця 10

Параметри тріщиностійкості дослідних сталей

Марка сталі	K_{IC} , МПа·м ^{1/2}			δ_C , мм			R_{MC} , МПа		
	Температура випробувань, °C								
	+20	-20	-40	+20	-20	-40	+20	-20	-40
16Г2АФ	99.8	81.5	72.1	0.72	0.49	0.39	897	784	595
20Ф	88.7	78.3	66.8	0.71	0.68	0.60	798	680	501
15ХСНДА	105.6	98.0	83.5	0.82	0.72	0.67	925	823	675
10ХСНДА	88.9	80.2	70.1	0.68	0.60	0.52	780	692	578
09Г2ФБ	111.4	98.5	82.5	0.88	0.79	0.62	956	856	670
06Г2Б	90.2	85.9	75.7	0.82	0.73	0.69	950	870	658
08ХМЧА	121	88.7	79.2	0.92	0.78	0.73	1123	934	789

Слід зазначити, що використання в сталях модифікатора ванадію (наприклад, сталь 09Г2ФБ), його вміст обмежують 0.1%. При вмісті ванадію 0.1-0.15% не відбувається подальшого роздрібнення зерна, ударна в'язкість при низьких температурах знижується [4, 6-8], тобто у випадку виробництва арматурної низьколегованої сталі слід вводити ванадій в кількості до 0.1%.

Використання в якості модифікатора сталі ніобію показало, що він слабо розкислює сталь, але в той же час є сильним карбідоутворюючим елементом. При наявності в сталі азоту може утворювати карбонітриди. Дослідами встановлено, що найбільш сприятливо впливає ніобій в малих кількостях (приблизно 0.02-0.03%) і особливо в поєднанні з алюмінієм (близько 0.02%). В цьому випадку підвищуються показники міцності і текучості (на 40МПа), знижується схильність сталі до старіння, тощо.

В цілому мікролегування низьколегованої нормалізованої сталі карбідо- і нітридоутворюючими елементами мало підвищує їх службові властивості. Застосування цих елементів в сталях контрольованої прокатки дозволяє отримати більш високі показники по усім властивостям.

Мікролегування низьколегованої сталі (наприклад, 06Х1) рідкоземельним елементом – церієм – в кількості 0.02-0.03% призводить до глобуляції неметалевих включень, кількість оксидів зменшується. Позитивний вплив церію на в'язкість пов'язаний з його впливом на форму і

кількість неметалевих включень, а також з деяким роздрібненням зерна. Механізм впливу рідкоземельних металів (РЗМ) на властивості сталі вивчений недостатньо. Однак, позитивний вплив РЗМ на форму неметалевих включень не викликає сумнівів. Обробка арматурних сталей церієм в кількості 0.02-0.03% сприяє отриманню високоякісного прокату з високими корозійно-механічними властивостями і який може використовуватися в будівництві залізобетонних споруд.

Виробництво вищенаведених легованих мікромодифікаторами сталей освоєно вітчизняними металургійними заводами (наприклад, АТ “Криворіжсталь”). Використання арматури із легованих мікромодифікаторами сталей дозволить подовжити робочий (безаварійний) ресурс трубних конструкцій в 2-3 рази, контактуючих постійно з корозійно-агресивними середовищами при знакозмінних навантаженнях. Приблизно підраховано, що для закінчення всього об'єму необхідних інвестицій на закінчення дослідно-конструкторських робіт і організацію промислового виробництва по усій номенклатурі трубних сталей нового покоління оцінюється в розмірі 1-2 млн. дол. США. Згідно розрахунку авторів розробок, інвестиції окупляться за 3-5 років при імпортозаміщенні всього 3-5% ринку.

Порівняльний аналіз свідчить, що легована мікромодифікаторами трубна сталь не має аналогів по стійкості проти корозійних ушкоджень і втомної міцності (втомленості), при цьому на 20-30% дешевше кращих світових зразків.

Помітний прогрес був досягнутий в області виробництва трубних сталей із застосуванням для модифікування ультра дисперсних порошків комплексних лігатур, зокрема, ферохрому, силікокальцію, сплавів заліза з ніобієм і ванадієм, алюмоцерієм та ін. що дозволило різко підвищити стандартизовані механічні властивості, δ , ψ , а також сучасні параметри тріщиностійкості K_{IC} , δ_C і R_{MC} , в результаті чого можна суттєво підвищити робочий ресурс арматури і в цілому залізобетонних конструкцій в 2-3 рази. Підраховано, що з-за скорочення ремонтно-відновлювальних робіт і їх циклів економія електроенергії і палива після таких ремонтів складає 10-15%.

Такі технології виробництва високоякісної трубної сталі для виготовлення трубних конструкцій використовуються на ряді будівельних об'єктів за кордоном. Дрібнозерниста структура труб та інших металоконструкцій, наприклад, мостових прольотів із сталевих конструкцій сприяє підвищенню їх довговічності (із 140-180 до 400-500 млн. циклів), тобто подовжується живучість сталевих конструкцій до 80-100 років безаварійної експлуатації в корозійних середовищах.

Встановлено що такі сталі з дрібнозернистою структурою містять володіють низьким вмістом водню, тобто залучивши сучасні уявлення із водневого матеріалознавства можна кардинально покращити властивості сталевих конструкцій. Таким чином, поєднання принципів економного модифікування сталей на базі ультра дисперсних порошків надасть можливість створювати конструкції з великим потенціалом стосовно експлуатаційних ресурсних можливостей.

Додаткові експериментальні дослідження показали, що міцність сталі мікромодифікованої ультра дисперсними порошками, наприклад, FeCe, AlCa, FeZr, FeV в 2-3 рази і більше, чим звичайної сталі (ВСтЗсп Ст10), а мікротвердість в 2-5 раз вище, ніж у крупнозернистих аналогів. Стосовно питань пластичних властивостей однозначної відповіді до цих пір не існує, що вимагає додаткових досліджень вчених. Однак, одна обставина сприймається доказовою базою – це те, що легування сталі ультра дисперсними порошками (ніобію, ванадію, церію, бору, молібдену) значно підвищує корозійну стійкість (в 3-5 раз), що надає перспективу розвитку цього напрямку.

Узагальнюючи викладене, можна констатувати, що при промисловому впровадженні мікромодифікованих сталей з використанням ультра дисперсних порошків існує два підходи. Перший, пов'язаний з їх використанням при створенні конструкцій і виробів нового покоління невеликої серійності і об'ємів, коли економічні міркування є другорядними, а головною метою стає отримання сталевих матеріалів з необхідними властивостями. Другий напрямок відноситься до рішення стандартних виробничих задач, коли застосування високоякісних матеріалів повинно забезпечити або економію витрат при виготовленні конструкцій, або зниження витрат при експлуатації конструкцій, виготовлених з нових сталевих матеріалів. В такому випадку виникає необхідність оцінки економічної доцільності освоєння виробництва таких високоякісних

матеріалів в промислових масштабах, співставлення витрат і отриманих результатів. Підвищення властивостей високоякісних сталей при використанні взамін традиційних аналогів дозволяє:

1) знизити витрати металу за рахунок полегшення маси конструкцій в зв'язку з унікальними фізико-механічними властивостями матеріалів;

2) знизити експлуатаційні витрати в процесі довготривалої служби конструкцій;

3) підвищити живучість відповідальних конструкцій.

До суттєвих факторів відноситься багато напрямків впровадження тих чи інших конструкцій в різних галузях промисловості. Це робить можливим інноваційне технологічне переозброєння енергетичного машинобудування, гірничодобувного і металургійного та ін. Ресурс виробів та конструкцій різного призначення, які виготовлені за новою металургійною технологією може збільшуватися до 50-100%.

В теперішній час основна активність, яка стосується високоякісних матеріалів і технологій їх виробництва, все ще зосереджена в області досліджень. Перехід на стадію масштабного впровадження у виробництво вимагає значних конструкторських розробок і інвестицій з боку промисловості.

На жаль, не дивлячись на те, що є очікуваний розвиток виробництва сталевих виробів чи конструкцій з використанням високоякісних сталей економно модифікованих ультра дисперсними порошками, до цих пір нема узагальнюючих робіт з оцінки економічної ефективності цього напрямку науки і техніки. В даній роботі вперше зроблена спроба усунути цей недолік. Складність її полягає в тому, що до цих пір наукові дослідження й розробки йдуть тільки на лабораторному рівні, але необхідні вкрай роботи пов'язані з широким впровадженням прогресивних метаріалів в будівельну галузь при спорудженні будівельних споруд і конструкцій, наприклад, гідротехнічного, каналізаційного, військового та ін. призначення.

Оцінку економічної ефективності використання високоякісної легованої ультра дисперсним порошком сталі необхідно проводити шляхом співставлення їх оціночних вартостей із вартістю традиційної сталі з урахуванням можливої зміни її витрат і експлуатаційних показників виробів чи конструкцій.

Економічні розрахунки показали, що застосування легованої трубної сталі ультра дисперсними порошками з ванадієм, ніобієм, церієм, молібденом та іншими екзотичними добавками дозволяє при правильній термообробці і експлуатації таких конструкцій отримати економічний ефект в розмірі 1.5-2.0 тис. дол. США на 1т труб для газопроводів; 2.2-3.0 тис. дол. США для мостових конструкцій і 3.5-5.0 тис. дол. США для підземної каналізації, що явно свідчить про перспективність використання трубних сталей нового покоління в промислових масштабах.

Висновки

Застосування високоякісних металевих матеріалів, мікромодифікованих ультра дисперсними порошками для створення виробів чи будівельних конструкцій нового покоління, визначається їх високою ефективністю, рівнем витрат на такі сталі (сплави), не вважається перешкодою до їх впровадження на промисловості.

На основі застосування інноваційних сталей можливо технічне переозброєння енергетичного транспортного машинобудування та гідротехнічної галузі. Ресурс таких конструкцій різного призначення збільшується від 50 до 100% в порівнянні зі стандартними. А тому, необхідно продовжувати роботи по удосконаленню технології їх отримання таких високоякісних матеріалів на металевій основі з ціллю покращення комплексу їх властивостей. В основі стратегії такого прориву порошкової металургії в економіці повинні знаходитися розробка пріоритетів напрацювання і послідовна реалізація короткотермінових цільових програм національного і регіонального рівнів, а також розробка довготермінової комплексної програми національного рівня і доведення робіт до практичної реалізації. А тому, необхідно також значно розширити фінансування цього напрямку.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Научная сессия общего собрания НАНУ, 19 декабря 2002г.// Вісник Національної академії наук України.- 2003.- №5.- С.8-11.
2. Makarenko V.D., Muravjev K.A., Kalyanov A.I. Special features of manual and welding of root joints in nonrotating welds in pipelines in Western Siberia.-Welding International.-2006.- №20(5).-P. 410-413.

3. Окада Т., Хаттори С. Зависимость между концентрацией соли в воде и сопротивлением коррозионной усталости конструкционной стали, содержащей 0.37% углерода. –Труды Американского общества инженеров-механиков. – Изд-во Мир: №3.-1085.-С. 98-107.
4. Макаренко В.Д., Максимов С.Ю., Винников Ю.Л. и др. Корозійні руйнування гідротехнічних споруд // Київ: Видавничий центр НУБіП України. – 2021.-195 с.
5. Коррозия: справочник / под ред. Л.Л. Шрайера; пер. с англ. М.: Металлургия, 1981. - 632 с.
6. Ликверман А.И. Эффективная система защиты металлических мостов от коррозии / А.И. Ликверман, Ф.Б. Глазман, К.О. Распоров // Транспортное строительство. 2001. №8. - С. 2-5.
7. Маринин А.Н. Сопротивление железобетонных конструкций воздействию хлоридной коррозии и карбонизации / А.Н. Маринин, Р.Б. Гарибов, И.Г. Овчинников. Саратов: Издат. центр «РАТА», 2008. 296 с.
8. Сахаров В.Н. Современные методы антикоррозионной защиты металлоконструкций в гидротехнике / В.Н. Сахаров, В.Г. Майоров // Гидротехническое строительство. 2005. №3. С. - 46-11.
9. Серебряников И.В. Антикоррозионная защита металлических конструкций мостов / И.В. Серебряников, В.К. Матвеев, В.В. Черкасов // Путь и путевое хозяйство. 2008. №5. - С. 10-12.
10. Старосельский А.А. Коррозия и защита железобетонных конструкций и сооружений электрифицированных железных дорог: учеб. пособие / А.А. Старосельский. Харьков: ХИИТ, 1988. - 82 с.
11. Шлугер М.А. Коррозия и защита металлов / М.А. Шлугер, Ф.Ф. Ажогин, Е.А. Ефимов. М.: Металлургия, 1981. - 216 с.
12. ISO 12944-1988 (части 1-8) Международный стандарт. Лаки и краски. Защита от коррозии стальных конструкций системами защитных покрытий.
13. Mezenov V. Tough call for coating / V.Mezenov, M. Golovnenkova // Bridge: design and engineering. 2009. N55. V.15. 64 p.
14. Бабік К.М., Гах Н.Д., Шалінський В.В. Технічний стан конструкцій та елементів земляної вставки автодорожнього переїзду спорудами Дніпровської ГЕС//Промислове будівництво та інженерні споруди.- №4.-2020.-С. 7-15.

REFERENCES

1. Nauchnaia sessiya obshcheho sobranyia NANU, 19 dekabria 2002h (Scientific session of the general meeting of NASU, December 19, 2002) // Visnyk Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy.- 2003.- №5.- S.8-11.
2. Makarenko V.D., Muravjev K.A., Kalyanov A.I. Special features of manual and welding of root joints in nonrotating welds in pipelines in Western Siberia.-Welding International.-2006.- №20(5).-P.410-413
3. Okada T., Khattory S. Zavysymost mezhdu kontsenratsyei soly v vode y soprotyvlenym korrozyonnoi ustalosti konstruktssyonnoi staly, sodержashchei 0.37% uhleroda (Relationship between salt concentration in water and corrosion fatigue resistance of structural steel containing 0.37% carbon). –Trudy Amerykanskoho obshchestva ynzhenyrov-mekhanikov. –Yzd-vo Mir: №3.-1085.-S.98-107.
4. Makarenko V.D., Maksymov S.Iu., Vynnykov Yu.L. y dr. Koroziini ruinyvannia hidrotekhnichnykh sporud (Corrosion destruction of hydraulic structures)// Kyiv: Vydavnychiy tsentr NUBiP Ukrainy. – 2021.-195s.
5. Korroziya: spravochnik (Corrosion: reference book) / pod red. L.L. Shraiera; per. s anhl. M.: Metallurhiya, 1981. 632 s.
6. Lykverman A.Y. Effektyvnaia sistema zashchyty metallicheskykh mostov ot korrozii (Effective system of corrosion protection of metal bridges) / A.Y. Lykverman, F.B. Hlazman, K.O. Rasporov // Transportnoe stroitelstvo. 2001. №8. S. 2-5.
7. Marynyn A.N. Soprotyvlenye zhelezobetonnykh konstruktssyi vozdeistviyu khloridnoi korrozii i karbonyzatsii (Resistance of reinforced concrete structures to chloride corrosion and carbonation)/ A.N. Marynyn, R.B. Harybov, Y.H. Ovchynnykov. Saratov: Yzdat. tsentr «RATA», 2008. 296 s.
8. Sakharov V.N. Sovremennye metody antykorrozyonnoi zashchyty metallokonstruktssyi v hidrotekhnike (Modern methods of anti-corrosion protection of metal structures in hydraulic engineering)/ V.N. Sakharov, V.H. Maiorov // Hidrotekhnicheskoe stroitelstvo. 2005. №3. S. 46-11.
9. Serebriannikov Y.V. Antykorrozyonnaia zashchyta metallicheskykh konstruktssyi mostov (Anti-corrosion protection of metal structures of bridges) / Y.V. Serebriannikov, V.K. Matveev, V.V. Cherkasov // Put y putevye khoziaistvo. 2008. №5. S.10-12.
10. Staroselskiy A.A. Korroziia i zashchita zhelezobetonnykh konstruktssyi i sooruzhenii elektrifitsirovannykh zheleznykh doroh: ucheb. Posobie (Corrosion and protection of reinforced concrete structures and structures of electrified railways: textbook. manual) / A.A. Staroselskiy. Kharkov: KhYYT, 1988. 82 s.
11. Shluher M.A. Korroziya i zashchyta metallov (Corrosion and protection of metals) / M.A. Shluher, F.F. Azhohyn, E.A. Efymov. M.: Metallurhiya, 1981. 216 s.
12. ISO 12944-1988 (chasty 1-8) Mezhdunarodnyi standart. Laki i kraski. Zashchita ot korrozii stalnykh konstruktssii systemami zashchitnykh pokrytii (ISO 12944-1988 (parts 1-8) International standard. Paints and varnishes. Corrosion protection of steel structures by protective coating systems).
13. Mezenov V. Tough call for coating / V.Mezenov, M. Golovnenkova // Bridge: design and engineering. 2009. N55. V.15. 64 p.
14. Babik K.M., Hakh N.D., Shalinskiy V.V. Tekhnichniy stan konstruktssii ta elementiv zemlianoi vstavky avtodorozhnoho pereizdu sporudamy Dniprovskoi HES (Technical condition of structures and elements of the earthen insert of the road crossing through the structures of the Dnieper HPP) //Promyslove budivnytstvo ta inzhenerni sporudy.- №4.-2020.-S.7-15

Стаття надійшла 03.06.2025

Макаренко В.Д., Савенко В.І., Макаренко Ю.В., Нестеренко І.С., Кислюк Д.Я.

ДОСЛІДЖЕННЯ, ОЦІНКА І ПІДВИЩЕННЯ МІЦНОСТІ СТАЛЕЙ ТА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ІННОВАЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ В БУДІВНИЦТВІ

Були проведені системні і комплексні дослідження мікромодифікованих сталей (сім марок), легованих ванадієм, хромом, церієм, нікелем, молібденом, ніобієм, з яких були виготовлені на прокатному стані арматурні стрижні діаметром 22 мм. Після цього стрижні були піддані термічній обробці для отримання різних структур, зокрема, ферито-перлітної, перлітної, структур неповного перетворення аустеніту (бейнітного перетворення) – структури сорбіту та троститу, а також мартенситу. Після цього з арматурних стрижнів готовилися зразки для випробувань на втомлену міцність (втомленість), статичні механічні властивості {межа міцності σ_B , МПа, межа текучості σ_T , МПа, відносне подовження – δ (%), поперечне суження – ψ (%)}, а також критерії сучасної механіки руйнування $\{K_{IC}$, МПа м^{1/2}, δ_C , мм, R_{MC} , МПа}. Крім того, визначали також показники швидкості корозії в корозійно-агресивних середовищах, які містили хлорид-іони, CO₂, аніони сірчатої кислоти, а також в бактеріальних модельних середовищах з бактеріями виду СВБ, ГТБ і ЗБ.

На основі застосування інноваційних сталей можливо технічне переозброєння енергетичного транспортного машинобудування та гідротехнічної галузі. Ресурс таких конструкцій різного призначення збільшується від 50 до 100% в порівнянні зі стандартними. А тому, необхідно продовжувати роботи по удосконаленню технологій отримання таких високоякісних матеріалів на металевій основі з ціллю покращення комплексу їх властивостей. В основі стратегії такого прориву порошкової металургії в економіці повинні знаходитися розробка пріоритетів напрацювання і послідовна реалізація короткотермінових цільових програм національного і регіонального рівней, а також розробка довготермінової комплексної програми національного рівня і доведення робіт до практичної реалізації. А тому, необхідно також значно розширити фінансування цього напрямку.

Ключові слова: економічна ефективність, легування, модифікатори, ультра дисперсні порошки, тріщиностійкість, довговічність.

Makarenko V.D., Savenko V.I., Makarenko Yu.V., Nesterenko I.S., Kysliuk D.Y.

RESEARCH, ASSESSMENT AND INCREASE IN THE STRENGTH OF STEELS AND ECONOMIC EFFICIENCY OF THE USE OF INNOVATIVE MATERIALS IN CONSTRUCTION

Systematic and comprehensive studies of micromodified steels (seven grades) alloyed with vanadium, chromium, cerium, nickel, molybdenum, niobium were carried out, from which reinforcing bars with a diameter of 22 mm were manufactured on a rolling mill. After that, the bars were subjected to heat treatment to obtain various structures, in particular, ferrite-pearlitic, pearlitic, structures of incomplete austenite transformation (bainite transformation) - structures of sorbite and trostite, as well as martensite. After that, samples were prepared from the reinforcing bars for testing fatigue strength (fatigue), static mechanical properties {strength limit σ_B , MPa, yield strength σ_T , MPa, relative elongation – δ (%), transverse narrowing – ψ (%)}, as well as criteria of modern fracture mechanics $\{K_{IC}$, MPa m^{1/2}, δ_C , mm, RMC, MPa}. In addition, corrosion rate indicators were also determined in corrosion-aggressive environments containing chloride ions, CO₂, sulfuric acid anions, as well as in bacterial model environments with bacteria of the SVB, GTB and ZB types.

Based on the use of innovative steels, technical re-equipment of energy transport engineering and the hydraulic engineering industry is possible. The resource of such structures for various purposes increases from 50 to 100% compared to standard ones. Therefore, it is necessary to continue work on improving the technologies for obtaining such high-quality materials on a metal basis in order to improve the complex of their properties. The strategy for such a breakthrough of powder metallurgy in the economy should be based on the development of development priorities and the consistent implementation of short-term target programs at the national and regional levels, as well as the development of a long-term comprehensive program at the national level and bringing the work to practical implementation. Therefore, it is also necessary to significantly expand the funding of this area.

Keywords: economic efficiency, alloying, modifiers, ultra-disperse powders, crack resistance, durability.

УДК 624.017

Макаренко В.Д., Савенко В.І., Макаренко Ю.В., Нестеренко І.С., Кислюк Д.Я. Дослідження, оцінка і підвищення міцності сталей та економічної ефективності використання інноваційних матеріалів в будівництві // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2025. – Вип. 115. – С. 262-270.

Наведені результати комплексних досліджень мікромодифікованих сталей (сім марок), легованих ванадієм, хромом, церієм, нікелем, молібденом, ніобієм. Високоякісні металеві матеріали, мікромодифіковані ультра дисперсними порошками можуть використовуватись для створення виробів чи будівельних конструкцій нового покоління, визначаються високою ефективністю та рівнем витрат на такі сталі (сплави).

Табл. 10. Бібліогр. 14 назв.

UDC 624.017

Makarenko V.D., Savenko V.I., Makarenko Yu.V., Nesterenko I.S., Kysliuk D.Y. Research, assessment and increase in the strength of steels and economic efficiency of the use of innovative materials in construction // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles – Kyiv: KNUBA, 2025. – Issue 115. – P. 262-270.

The results of comprehensive studies of micromodified steels (seven grades) alloyed with vanadium, chromium, cerium, nickel, molybdenum, and niobium are presented. High-quality metal materials micromodified with ultra-dispersed powders can be used to create new-generation products or building structures, determined by the high efficiency and cost level of such steels (alloys).

Tabl. 10. Ref. 14.

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор, професор кафедри технології будівельних конструкцій і виробів Київського національного університету будівництва і архітектури Макаренко Валерій Дмитрович

Адреса: 03037 м.Київ, просп. Повітряних Сил, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури

Тел. +38(066)-747-67-90

E-mail: green555tree@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9178-9657>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): доктор технічних наук(ФРН), доктор будівництва АБУ,доцент, професор кафедри організації і управління будівництвом Київського національного університету будівництва і архітектури Савенко Володимир Іванович

Адреса: 03037 м.Київ, просп. Повітряних Сил, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури

Тел. +38(097)-747-67-90

E-mail: savenkoknuba@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1490-6730>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): магістерка університету Манітоба (Канада) Макаренко Юлія Валеріївна

Тел. +38(066) 970-6659

E-mail: green555tree@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1252-4231>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): кандидат технічних наук,доцент, доцент кафедри організації і управління будівництвом Київського національного університету будівництва і архітектури Нестеренко Ірина Сергіївна

Адреса: 03037 м.Київ, просп. Повітряних Сил, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури

Тел. +38(067)-719-19-18

E-mail: savenkoknuba@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1023-1861>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, доцент кафедри будівництва та цивільної інженерії Луцького національного технічного університету Кислюк Дмитро Ярославович

Адреса: 43018, Україна, м. Луцьк Волинська обл., вул. Львівська, 75, Луцький національний університет

Тел. +38(095)-395-49-00

E-mail: d.kyslyuk@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5794-8466>