

БУРЛАКА СЕРГІЙ

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0002-4079-4867>e-mail: [ipserhiy@gmail.com](mailto:ipserhiy@gmail.com)

ЧУБЕНКО НАЗАРІЙ

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0009-0005-7162-8844>e-mail: [nazarichubenko@gmail.com](mailto:nazarichubenko@gmail.com)

## ЛЕГУВАННЯ СТАЛІ ЯК ЕФЕКТИВНИЙ ЗАХИСТ ПРОТИ КОРОЗІЇ

Корозія сталі є серйозною проблемою для багатьох галузей промисловості, включаючи будівництво, машинобудування та інші інженерні дисципліни. У статті досліджується вплив легування на підвищення корозійної стійкості сталі, шляхом введення в її склад таких елементів, як хром, нікель, молібден, ванадій та мідь.

Ключові слова: стійкість сталі, легування сталі, хром, нікель, молібден, ванадій, мідь, пасивуючий шар, точкова корозія, хлоридна корозія, електротермічне легування.

BURLAKA SERHIY, CHUBENKO NAZARIY

Vinnytsia National Agrarian University

### ALLOYING STEEL AS AN EFFECTIVE PROTECTION AGAINST CORROSION

Steel corrosion is a serious problem for many industries, including construction, mechanical engineering, and other engineering disciplines. This article examines the impact of alloying on enhancing the corrosion resistance of steel by introducing elements such as chromium, nickel, molybdenum, vanadium, and copper into its composition.

The main focus is on the mechanisms of action of each of these alloying elements. Chromium forms a passive oxide layer on the steel surface, which prevents the access of oxygen and moisture, thereby inhibiting corrosion processes. Nickel increases the overall resistance of steel to oxidation and corrosion, especially in aggressive environments such as acids. Molybdenum contributes to the improvement of resistance to pitting and chloride-induced corrosion, reducing the likelihood of corrosion cracking.

The article also analyzes the technological aspects of the alloying process, including electrothermal and metallothermic methods of introducing alloying elements. Special attention is paid to process parameters that affect the quality and uniformity of the distribution of alloying elements in the alloy.

Compared to other methods of protecting steel from corrosion, such as coatings (paints, varnishes, zinc coatings) and the use of corrosion inhibitors, alloying has several advantages. It provides long-term protection and effectively reduces corrosion damage even in the most aggressive operating conditions.

In conclusion, it is summarized that alloying steel is one of the most effective methods of enhancing its corrosion resistance. The correct choice of alloying elements and their concentrations can significantly extend the service life of steel products, reduce maintenance and repair costs. The research results have important practical significance for engineers and technologists, contributing to the development of new materials with improved properties and the improvement of existing steel protection technologies.

Keywords: steel corrosion resistance, steel alloying, chromium, nickel, molybdenum, vanadium, copper, passive layer, pitting corrosion, chloride corrosion, electrothermal alloying.

### Постановка проблеми

Корозія сталі є серйозною проблемою для багатьох галузей промисловості, включаючи будівництво, машинобудування та інші інженерні дисципліни. Корозійні процеси призводять до значних економічних втрат через пошкодження і передчасний вихід з ладу сталевих конструкцій та виробів. Традиційні методи захисту сталі, такі як нанесення покриттів та використання інгібіторів корозії, не завжди забезпечують достатній рівень захисту, особливо в агресивних середовищах. Виникає необхідність у пошуку більш ефективних способів підвищення корозійної стійкості сталі [1]. Легування сталі, тобто введення в її склад спеціальних хімічних елементів, є перспективним напрямком для вирішення цієї проблеми [2]. Однак, необхідно глибше дослідити механізми дії різних легуючих елементів та їх вплив на корозійні властивості сталі, а також розробити оптимальні технологічні процеси легування.

### Аналіз останніх джерел

Останні дослідження підтверджують значний прогрес у розумінні впливу легування на корозійні властивості сталі. Вони вказують на ключову роль різних легуючих елементів, зокрема хрому, нікелю, молібдену, ванадію та міді, у формуванні захисних оксидних шарів на поверхні металу, які запобігають розвитку корозійних процесів [3]. Наприклад, дослідження показують, що хромові сталі утворюють стійкі пасивуючі шари оксиду, які дозволяють захистити метал від впливу кисню та вологи. Нікель додає стійкості до корозії в агресивних хімічно активних середовищах, таких як кислоти, тоді як молібден і ванадій покращують стійкість до точкової корозії та корозії в хлоридних середовищах.

Додатково, висвітлено значення технологічних аспектів процесів легування, таких як електротермічне і металотермічне легування, які впливають на однорідність розподілу легуючих елементів у сталевому сплаві [4]. Ці дослідження сприяють розробці оптимальних технологій легування, що максимізують корозійну стійкість сталі і знижують витрати на її експлуатацію та обслуговування.

**Метою роботи є:** дослідження та аналіз впливу легування на підвищення корозійної стійкості сталі. Основні цілі включають вивчення механізмів дії різних легуючих елементів (хрому, нікелю, молібдену,

ванадію, міді) на формування захисних покриттів на поверхні сталі, аналіз технологічних аспектів процесів легування, порівняння ефективності легування з іншими методами захисту від корозії, а також встановлення практичних рекомендацій для оптимізації використання легованих сталей у виробничих та інженерних застосуваннях.

### Виклад основного матеріалу

Основні легуючі компоненти, які використовуються для підвищення корозійної стійкості прецизійних сплавів, включають хром і нікель. Також можуть застосовуватись алюміній, мідь, титан, ніобій та інші елементи.

Наприклад, сталь марки 12X18H10T відноситься до високолегованих хром-нікелевих сплавів і, завдяки поєднанню хімічних елементів у її складі, має підвищену стійкість до корозії [5]. Однак кожен з введених компонентів впливає лише на певні антикорозійні властивості металу:

- Хром утворює на поверхні металу пасивний захисний шар під впливом кисню, який запобігає утворенню іржі.
- Нікель стабілізує аустенітну структуру металу, надаючи йому високу міцність і еластичність, і також запобігає ржавінню при пошкодженні поверхневого шару, зокрема в місцях зварних з'єднань.
- Молибден запобігає утворенню точкової корозії і підвищує стійкість до окислення при високих температурах.
- Титан не впливає на загальну стійкість металу до окислення, але запобігає міжкристалічній корозії, що дозволяє створювати стійкі до руйнування зварні конструкції і вироби, що не піддаються впливу хлоридних іонів [6].

Легування металів може виконуватись двома способами: об'ємним або поверхневим. При об'ємному легуванні корисні хімічні елементи вводяться у весь об'єм плавленого сплаву, у поверхневому легуванні - лише в поверхневий шар на глибину не більше 1-2 мм.

Основний метод об'ємного легування - сплавлення основного металу з легуючими компонентами у тигельних, індукційних, дугових, плазмових печах та інших. Однак при цьому способі можливі великі втрати активних хімічних елементів, таких як титан, молибден, хром тощо [7]. Для зменшення втрат корисних добавок застосовуються лігатури - різноманітні компоненти, що підвищують ефективність процесу плавлення металу. У нікелевих сплавах в якості лігатур використовують алюміній, марганець, цирконій або цинк.

Поверхнєве легування передбачає дифузійне насичення зовнішнього шару металу під час термічної обробки (в рідкій або газовій фазі). Також існує твердофазний метод, який полягає в нанесенні легуючих компонентів у вигляді шару потрібної товщини і його подальшому розплавленні для утворення нового сплаву на поверхні основного металу табл.1.

Таблиця 1

#### Вплив товщини легованого шару на стійкість до корозії

Товщина легованого шару	Стійкість до корозії
До 25 мкм	Низька
25-50 мкм	Помірна
50-100 мкм	Середня
Понад 100 мкм	Висока

Основна ідея полягає в тому, що легований шар діє як бар'єр, що запобігає контакту металу з агресивними середовищами, такими як вода чи кислоти, які можуть спричинити окислення металу (корозію). Отже:

- До 25 мкм (мікрометрів): В тонких легованих шарах бар'єрна функція може бути недостатньою для повного захисту металу, особливо в агресивних середовищах. Це може призводити до швидкого проникнення агресивних речовин і, відповідно, до низької стійкості до корозії.
- 25-50 мкм: У цьому діапазоні товщина шару вже може забезпечувати помірний захист, оскільки більша кількість матеріалу відокремлює метал від зовнішнього середовища.
- 50-100 мкм: Шар такої товщини здатен забезпечувати середню стійкість, оскільки він ефективніше захищає метал від зовнішніх факторів.
- Понад 100 мкм: Висока товщина легованого шару значно підвищує стійкість до корозії, оскільки вона створює міцний і стійкий бар'єр, який майже повністю ізолює метал від агресивного середовища [8].

Таблиця 2

#### Величина струму для різних видів легування

Тип легування	Сила струму (Ампері)
Індукційне легування	500-2000
Дугове легування	100-500
Електрохімічне	1-10

Ці методи демонструють широкий спектр можливостей для легування сталі залежно від потреб у конкретних властивостях матеріалу, ефективності процесу та економічних обмежень. Вибір оптимального методу легування залежить від конкретних умов виробництва і вимог до якості кінцевого продукту табл. 3.

Вплив сили струму і часу нанесення на товщину шару

Сила струму (Амperi)	Товщина шару (мікрометри)	Час нанесення (години)
10	5	20
20	10	10
30	15	7

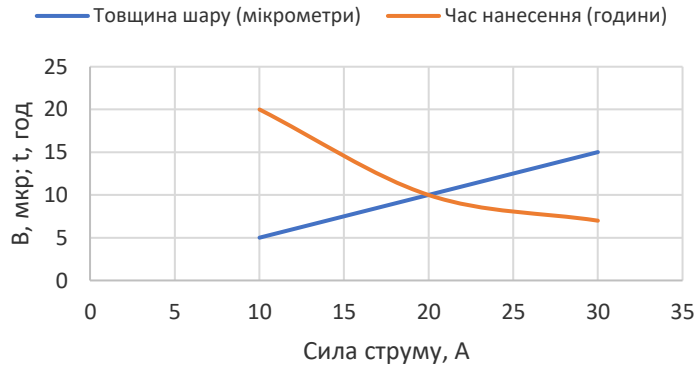


Рис. 1. Залежність товщини шару нанесеного легуючого матеріалу від часу та сили струму

Сила струму є одним із ключових параметрів у процесі електрохімічного легування, який безпосередньо впливає на якість і характеристики утвореного легуваного шару. При збільшенні сили струму зазвичай збільшується швидкість осадження легуючих елементів і, відповідно, товщина шару зменшується за однаковий час. В таблиці наведені значення демонструють цю взаємозв'язаність: зі збільшенням сили струму товщина шару зменшується, що вимагає меншого часу для досягнення потрібної товщини.

### Висновки

Дослідження підтверджує, що введення легуючих елементів, таких як хром, нікель, молібден, ванадій та інші, значно підвищує корозійну стійкість сталі. Ці елементи утворюють захисні оксидні шари на поверхні металу, які запобігають проникненню води і кисню, тим самим знижуючи ризик ржавіння.

Кожен легуючий елемент має свої унікальні властивості, що сприяють підвищенню стійкості до корозії. Наприклад, хром утворює пасивний оксидний шар, нікель стабілізує аустенітну структуру, а молібден попереджує точкову корозію.

Порівняно з традиційними методами, такими як покриття або використання інгібіторів корозії, легування забезпечує тривалий та ефективний захист навіть у високоагресивних умовах експлуатації.

### Література

1. Yaropud V., Kupchuk I., Burlaka S., Rutkevych V. Results of numerical modeling of three-pipe heat exchanger for livestock premises. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2023. Vol. 99. № 9. P. 72–75.
2. Yaropud V., Aliiev E., Mazur I., Burlaka S. Simulating the process of operation of vortex layer electromagnetic apparatus with ferromagnetic working elements. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2023. Vol. 99. № 9. P. 64–71.
3. Burlaka S., Yemchik T. Improving the efficiency of the use of biodiesel fuel mixtures in the systems of autonomous energy supply of agricultural enterprises. In: *Modernization of research area: national prospects and European practices: Scientific monograph*. Riga, Latvia: Baltija Publishing, 2022. P. 205–237.
4. Малаков О.І., Бурлака С.А., Ярошук Р.О. Зниження навантаження елементів конструкції моста керованих коліс самохідної косарки шляхом раціональної установки гідроциліндрів. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2018. № 4 (263). С. 56–61.
5. Гунько І.В., Бурлака С.А., Ярошук Р.О. Вибір оптимальної методики покращення складу сумішевого біопалива з рослинних олій. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2018. № 4 (263). С. 123–127.
6. Гунько І.В., Бурлака С.А., Єленич А.П. Оцінка екологічності нафтового палива та біопалива з використанням методології повного життєвого циклу. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2018. Том 2. № 6 (267). С. 246–249.

7. Веселовська Н.Р., Малаков О.І., Бурлака С.А. Експериментальні дослідження силового впливу на робочі органи і приводи зернозбиральних комбайнів. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2019. № 2 (271). С. 37–44.

8. Макаревич О.П., Федоров Г.Є., Платонов Є.О. Виробництво виливків із спеціальних сталей : монографія. К. : Видавництво НТУУ “КПІ”, 2005. 717 с.

#### References

1. Yaropud V., Kupchuk I., Burlaka S., Rutkevych V. Results of numerical modeling of three-pipe heat exchanger for livestock premises. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2023. Vol. 99. No. 9. P. 72–75.
2. Yaropud V., Aliyev E., Mazur I., Burlaka S. Simulating the process of operation of vortex layer electromagnetic apparatus with ferromagnetic working elements. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2023. Vol. 99. No. 9. P. 64–71.
3. Burlaka S., Yemchik T. Improving the efficiency of the use of biodiesel fuel mixtures in the systems of autonomous energy supply of agricultural enterprises. In: *Modernization of research area: national prospects and European practices: Scientific monograph*. Riga, Latvia: Baltija Publishing, 2022. P. 205–237.
4. Malakov O.I., Burlaka S.A., Yaroschuk R.O. Reducing the load on the bridge construction elements of the steerable wheels of the self-propelled mower by rational installation of hydraulic cylinders. *Herald of Khmelnytskyi National University. Series: Technical sciences*. 2018. No. 4 (263). P. 56–61.
5. Gunko I.V., Burlaka S.A., Yaroschuk R.O. Choosing the optimal method for improving the composition of mixed biofuel from vegetable oils. *Herald of Khmelnytskyi National University. Series: Technical sciences*. 2018. No. 4 (263). P. 123–127.
6. I.V. Gunko, S.A. Burlaka, A.P. Yelenich. Environmental assessment of oil fuel and biofuel using the full life cycle methodology. *Herald of Khmelnytskyi National University. Series: Technical sciences*. 2018. Volume 2. No. 6 (267). P. 246–249.
7. Veselovska N.R., Malakov O.I., Burlaka S.A. Experimental studies of force influence on working bodies and drives of grain harvesters. *Herald of Khmelnytskyi National University. Series: Technical sciences*. 2019. No. 2 (271). P. 37–44.
8. Makarevych O.P., Fedorov G.E., Platonov E.O. Production of castings from special steels: Monograph. K.: Publishing House of NTUU "KPI", 2005. 717 p.