

## ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ ПОРОШКОВОГО ДРОТУ ШЛЯХОМ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ХІМІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ПОКАЗНИКИ НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ

*Проблема збереження ресурсів є однією з найважливіших, адже в різних галузях промисловості щороку витрачаються десятки тисяч тон металу для виготовлення запасних частин та заміни швидкозношуваних деталей. Це вимагає великих трудових витрат, призводить до збільшення простоїв обладнання, потреби в заміні зношених елементів і зниження продуктивності машин та апаратів. Підвищення зносостійкості та тривалості служби обладнання є важливим завданням виробництва. Одним із ефективних шляхів розв'язання цієї проблеми є відновлення деталей машин та інструментів і подовження їхнього терміну служби за допомогою електродугового наплавлення. У багатьох випадках для цього використовуються дефіцитні легувальні матеріали, що робить процес дорогим. Рішенням є розробка нових економнолегованих наплавних матеріалів, які покращують експлуатаційні властивості. У зв'язку з цим у роботі досліджуються можливості створення зносостійких наплавних матеріалів, які забезпечують отримання наплавленого металу з властивістю динамічного самозміцнення під час експлуатації, що підкреслює актуальність і важливість цього напрямку для різних галузей промисловості. Методи дослідження: під час проведення досліджень використовували: металографічний аналіз, хімічний та рентгеноспектральний аналіз наплавленого металу, вимірювання твердості, комплексні випробування на зносостійкість за умов сухого тертя, абразивного та ударно-абразивного зношування, а також математичне моделювання наплавленого металу системи Fe-Cr-Mn-Ni-N.*

**Ключові слова:** порошковий дріт, аустеніт, зносостійкість, легування, дугове наплавлення, карбіди, нітриди, математичне моделювання.

**Постановка проблеми.** Для розробки економнолегованих наплавних матеріалів була обрана система легування Fe-Cr-Mn-Ni-N. Наявність дорогого нікелю в системі легування вимагає зниження його вмісту у складі наплавленого металу для скорочення витрат. Обрана система легування демонструє добрі результати за умов абразивного, ударно-абразивного та сухого зношування. Основними легувальними елементами наплавленого металу обрано такі компоненти: хром, нікель, азот.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Одним із відомих методів відновлення та підвищення довговічності деталей машин і конструкцій є електродугове наплавлення, яке особливо ефективне при використанні порошкових дротів [1,2]. Електродугове наплавлення має низку переваг порівняно з іншими видами наплавлення завдяки простоті технології, широким можливостям формування різного хімічного складу наплавленого металу та його високій якості. Перспективним напрямом є створення наплавних матеріалів без дорогих легувальних елементів, таких як Ni, V, Mo. У цьому випадку легування доцільно та економічно вигідно здійснювати недорогими та широко розповсюдженими в Україні компонентами, як-от марганець, хром, кремній тощо [3].

Склад і структура наплавленого металу визначають його призначення та здатність працювати за різних видів зношування: сухого тертя металу об метал, ударно-абразивного, абразивного, корозійного, кавітаційного. Серед них найчастіше наплавлення застосовується для деталей, які працюють за умов абразивного, ударно-абразивного зношування та тертя ковзання металу об метал. Основний аналіз літературних даних зосереджено на роботах,

## Машинобудування і зварювальне виробництво

пов'язаних з наплавленням зносостійких металів. Серед використовуваних наплавних матеріалів особливий інтерес становлять матеріали на основі Fe-Cr-Mn, оскільки вони не містять дорогих легувальних елементів [4]. У дослідженнях [11,12] показано схожість впливу нікелю та марганцю на формування структури сталей, що дозволяє використовувати марганець як заміну дорогому нікелю.

**Мета дослідження.** Метою роботи є розробка наплавного матеріалу у вигляді порошкового дроту та флюсу, що забезпечують утворення метастабільного аустеніту в наплавленому металі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- Дослідити вплив легування на формування структури наплавленого металу;
- Визначити оптимальні режими для досягнення необхідних властивостей металу під термічним та динамічним впливом;
- Розробити склад порошкового дроту та флюсу, що забезпечують отримання зносостійкого наплавленого металу.

**Основний матеріал дослідження.** Існує тип наплавних матеріалів, заснований на принципі отримання в наплавленому металі структури метастабільного аустеніту, який під час навантаження в процесі експлуатації зазнає мартенситних перетворень. Роль мартенситного перетворення полягає в тому, що під час експлуатації відбувається не лише зміцнення, але й релаксація мікронапружень, що ускладнює утворення та зростання тріщин. Вибір оптимального режиму наплавлення та термообробки після наплавлення дозволяє активувати розвиток мартенситних перетворень при навантаженні, досягаючи максимальної зносостійкості наплавлених деталей [5–13]. Структура метастабільного аустеніту, порівняно з іншими, має значно більшу енергоємність, через що більша частина енергії зовнішнього впливу витрачається на розвиток мартенситних перетворень, а менша частина – на руйнування.

Найкращі результати демонструють сплави на хромомарганцевій основі. Властивості цих сплавів можуть бути значно покращені шляхом легування різними елементами [10]. Вплив легування на зміцнення обумовлений низкою факторів. Легувальні елементи створюють спотворення кристалічної решітки, змінюють енергію міжатомних зв'язків аустеніту, впливають на його стабільність. Стабілізуючий ефект при введенні легувальних елементів значною мірою залежить від їхнього впливу на утворення дефектів упаковки кристалічної решітки.

Внаслідок легування зменшується ймовірність утворення дефектів упаковки, що пов'язано зі стабілізуючим впливом легувальних елементів. Крім цього, відбувається закріплення дислокацій атомами впровадження та зниження рухливості комірок, які утворюються при деформації, що призводить до стабілізації аустеніту [10]. Кількісне співвідношення між аустенітом і мартенситом, яке визначає рівень механічних властивостей сплавів, залежить від хімічного складу та розташування мартенситної точки [13].

Було вивчено роботи, присвячені впливу азоту на структуру та зносостійкість наплавленого металу 20X18H8ЮАТ [14–17]. Введення азоту підвищує зносостійкість металу за рахунок зниження дефектів упаковки.

Регулювання співвідношення між мартенситом і аустенітом у наплавленому металі дозволяє адаптувати його до конкретних умов експлуатації, що підкреслює науковий і практичний інтерес до подальших досліджень у розробці наплавних матеріалів у вигляді порошкових дротів.

Для наплавлення деталей, що працюють в умовах абразивного зношування, були розроблені наплавні матеріали на основі Fe-Mn-Cr-V-C [18]. Особливістю цих матеріалів є утворення в структурі наплавленого металу метастабільного аустеніту (у деяких випадках разом із мартенситом), зміцненого карбідами хрому та ванадію.

## Машинобудування і зварювальне виробництво

Хром є феритоутворюючим елементом, який знижує мартенситну точку і зменшує розчинність вуглецю в аустенітній фазі. Марганець, у свою чергу, має сильний аустенізуючий ефект, стабілізуючи аустенітну фазу при високих температурах.

Якщо підсумувати, можна виділити основні фактори, що обумовлюють підвищену зносостійкість наплавленого металу з метастабільним аустенітом на хромомарганцевій основі. Це включає:

- Вплив хрому на зниження мартенситної точки і стабільність аустеніту, що сприяє утворенню зносостійкої структури;
- Аустенізуючий ефект марганцю, що допомагає підтримувати аустеніт у стабільному стані при різних температурах, підвищуючи механічні властивості металу;
- Формування зміцнюючих фаз, таких як карбіди хрому і ванадію, що ще більше покращують зносостійкість металу під час експлуатації.

Формування механічних властивостей в наплавленому метастабільному металі при виборі наплавних матеріалів для відновлення та підвищення зносостійкості деталей необхідно враховувати умови зношування. В умовах, де переважають такі види зношування, як сухе тертя металу об метал, абразивне та ударно-абразивне зношування, коли ударна складова мінімальна, потрібні матеріали з високими показниками твердості та міцності [5]. У цьому випадку перевага надається твердим структурам в поверхневому шарі: мартенсит, бейніт, карбіди, бориди тощо. Однак в умовах ударно-абразивного зношування, коли ударна складова велика, основними параметрами металу є його енергоємність, здатність поглинати зовнішню енергію ударного впливу; в цьому випадку твердість не є вирішальним фактором. Основними показниками для наплавленого металу в таких умовах є в'язкість структури з низькою твердістю, такі як аустеніт чи ферит. Тому для цього краще використовувати наплавні матеріали, що дозволяють отримати аустеніт в наплавленому металі, оскільки він є більш в'язким і міцним.

З цього можна зробити висновок, що найбільш перспективним для підвищення міцнісних характеристик наплавленого металу є створення матеріалів з нестабільною аустенітною структурою, яка здатна зазнавати деформаційне мартенситне перетворення [3]. Деформаційне мартенситне перетворення дозволяє поглинати енергію зовнішнього впливу, в результаті чого менша частина енергії йде на руйнування наплавленого металу, що позитивно впливає на зносостійкість.

Під час деформаційного мартенситного перетворення з в'язкого і відносно м'якого аустеніту утворюється мартенсит деформації. Мартенсит деформації є однією з найтвердіших структур. Основною перевагою динамічного мартенситного перетворення є те, що відбувається релаксація мікронапружень в укріплених ділянках [3], що запобігає розвитку мікротріщин. Ці фактори збільшують працездатність наплавленого металу.

Вплив абразивних частинок призводить до утворення мартенситу та наклепу залишкового аустеніту в зоні контакту. Внаслідок зношування відбувається зміцнення наплавленого металу в поверхневому шарі, товщина цього шару залежить від силових впливів у зоні зношування, ступеня метастабільності аустеніту, а також обсягу деформаційного мартенситного перетворення. Товщина укріпленого шару коливається від кількох мікрометрів до міліметра.

У сталях класу Fe-Cr-Mn в поверхневому шарі під час експлуатації утворюється  $\alpha'$ -мартенсит, який перевищує за зносостійкістю  $\epsilon'$ -мартенсит, що утворюється в Fe-Mn сталях; ці результати є актуальними і для наплавних матеріалів [19,20]. У роботі [3] показано, що утворення  $\epsilon'$ -мартенситу починається з концентрації марганцю 10-12%. У роботі [17] доведено, що механічні властивості поверхневого шару залежать, з одного боку, від фазового складу і структури наплавленого металу, отриманого при наплавленні та термообробці, а з іншого боку — від кінетики динамічного мартенситного перетворення, складу, кількості і структури утвореного мартенситу деформації. Основними перевагами наплавних матеріалів на основі

## Машинобудування і зварювальне виробництво

Fe-Cr-Mn є можливість регулювання міцнісних параметрів наплавленого металу за допомогою легування, режимів та параметрів термічної обробки, умов зношування при випробуваннях і експлуатації.

Температура відпуску також впливає на механічні властивості, які залежать від кінетики деформаційного мартенситного перетворення та кількості утвореного при деформації  $\alpha'$ -мартенситу деформації. У роботі [15] встановлено, що оптимальна кінетика деформаційного мартенситного перетворення досягається при температурі відпуску 650°C.

Також слід зазначити, що окрім деформаційного мартенситного перетворення в поверхневому шарі під час процесу зношування може відбуватися динамічне деформаційне старіння мартенситу загартування, мартенситу деформації та залишкового аустеніту з виділенням дисперсних карбідів, нітридів. Ці фактори, в свою чергу, також сприяють підвищенню зносостійкості.

Виходячи з усіх факторів механізмів зміцнення матеріалів з метастабільним аустенітом, слід зазначити, що їх комплексне використання дасть значний вигравш у формуванні експлуатаційних властивостей.

Для проведення багатфакторного експерименту була вибрана регресійна квадратична математична модель. Для математичної обробки результатів експериментів значення факторів прийняті у закодованому вигляді (табл. 1).

Таблиця 1 – Фактори та рівні їх варіювання

Фактори	X <sub>1</sub> (Cr,%)	X <sub>2</sub> (Ni,%)	X <sub>3</sub> (N,%)
Основний рівень (X <sub>i0</sub> )	19,0	3,0	0,15
Інтервал ( $\Delta X_i$ )	0,5	3,0	0,05
Верхній рівень (X <sub>i</sub> = 1)	19,5	9,0	0,20
Нижній рівень (X <sub>i</sub> = -1)	18,5	2,5	0,05
Зіркова точка + $\alpha$	20,0	9,5	0,25
Зіркова точка - $\alpha$	18,0	2,0	0

Кодовані та натуральні значення факторів були пов'язані наступними співвідношеннями:

$$X_1 = \frac{Cr, \% - 19,0}{2,5}; X_2 = \frac{Ni, \% - 3,0}{3,0}; X_3 = \frac{N, \% - 0,15}{0,05}; \quad (1)$$

За отриманими експериментальними даними були розраховані регресійні залежності твердості та зносостійкості від хімічного складу наплавленого металу.

Зносостійкість та твердість наплавленого металу досліджувалися при різних складах порошкової проволочки. Відносна зносостійкість позначена таким чином:  $\epsilon$  – сухе тертя,  $\epsilon_a$  – абразивний знос,  $\epsilon_{y-a}$  – ударно-абразивний знос. Твердість позначена як – HRC. Також було проведено розрахунок впливу відпуску при 650°C на твердість і зносостійкість наплавленого металу.

Рівняння регресії отримано у наступному загальному вигляді:

$$Y_i = \beta_0 X_{1i} + \beta_1 X_{1i}^2 + \beta_2 X_{2i} + \beta_3 X_{3i} + \epsilon_i \quad (2)$$

де  $\beta_0$  — зсув,  $\beta_1$  — коефіцієнт лінійного ефекту,  $\beta_2$  — коефіцієнт квадратичного ефекту,  $\epsilon_i$  — випадкова помилка змінної Y в i-му спостереженні.

Умови експериментів та їх результати наведені в таблиці 2.

## Машинобудування і зварювальне виробництво

За результатами квадратичного рівняння регресії були проведені розрахунки показників твердості та зносостійкості до і після низькотемпературного відпуску. Адекватність моделі перевіряли за критерієм Фішера (табл. 2).

Перевірка показала, що квадратичні моделі виду (2) адекватно описують експериментальні результати з ймовірністю 95%.

Середня відносна похибка, що оцінюється через різницю між експериментальними та розрахунковими значеннями твердості та зносостійкості, складає від 2 до 5%.

Рівняння, отримані після перетворення факторів із кодованих значень у натуральний масштаб, наведені нижче у наступному вигляді.

$$\text{HRC}_{650^\circ\text{C}} = 452,9 \cdot \text{Cr} - 11,9 \cdot \text{Cr}^2 + 3,8 \cdot \text{Ni} \cdot \text{N} - 4270,3 \quad (3)$$

$$\text{HRC} = 11,2 \cdot \text{Cr} + 1307,5 \cdot \text{N} - 69 \cdot \text{Cr} \cdot \text{N} - 184,1 \quad (4)$$

$$\varepsilon = -0,04 \cdot \text{Ni} + 67,6 \cdot \text{N} + 0,015 \cdot \text{Cr}^2 - 3,65 \cdot \text{Cr} \cdot \text{N} + 0,35 \cdot \text{Ni} \cdot \text{N} - 3,63 \quad (5)$$

$$\varepsilon_{650^\circ\text{C}} = 4,71 \cdot \text{N} + 0,0034 \cdot \text{Cr}^2 + 0,0015 \cdot \text{Ni}^2 - 16,29 \cdot \text{N}^2 + 0,93 \quad (6)$$

$$\varepsilon_a = 0,77 \cdot \text{Cr} + 0,00039 \cdot \text{Cr} \cdot \text{Ni} + 0,2 \quad (7)$$

$$\varepsilon_{a\ 650^\circ\text{C}} = -10,6 \cdot \text{Cr} - 1,01 \cdot \text{Ni} + 27,04 \cdot \text{N} + 0,27 \cdot \text{Cr}^2 + 0,06 \cdot \text{Cr} \cdot \text{Ni} - 1,29 \cdot \text{Cr} \cdot \text{N} - 0,0087 \cdot \text{Ni}^2 - 0,57 \cdot \text{Ni} \cdot \text{N} + 102,62 \quad (8)$$

$$\varepsilon_{y-a} = 0,25 \cdot \text{Cr} + 28 \cdot \text{N} - 1,55 \cdot \text{Cr} \cdot \text{N} - 0,0017 \cdot \text{Ni}^2 + 0,16 \cdot \text{Ni} \cdot \text{N} - 2,81 \quad (9)$$

$$\varepsilon_{y-a\ 650^\circ\text{C}} = 0,069 \cdot \text{Ni} - 0,005 \cdot \text{Ni}^2 + 2,36 \quad (10)$$

Таблиця 2 – Матриця планування експерименту

№	Вміст комп-в, %			Зносостійкість та твердість НМ							
	Cr	Ni	N	HRC <sub>650°C</sub>	HRC	ε	ε <sub>650°C</sub>	ε <sub>a</sub>	ε <sub>a 650°C</sub>	ε <sub>y-a</sub>	ε <sub>y-a 650°C</sub>
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	Y <sub>5</sub>	Y <sub>6</sub>	Y <sub>7</sub>	Y <sub>8</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	19	3	0,15	35	29	1,6	2,6	1,71	2,4	1,93	2,55
2	18,6	3,9	0,16	33	27	1,5	2,6	1,72	2,45	1,93	2,58
3	19,1	3,6	0,12	31	30	1,7	2,6	1,75	2,48	1,91	2,53
4	18,9	3,3	0,14	35	27	1,5	2,5	1,75	2,45	1,91	2,53
5	19,2	4,1	0,17	32	28	1,6	2,5	1,73	2,43	1,93	2,55
6	18,8	3,8	0,12	32	29	1,6	2,65	1,73	2,37	1,95	2,55
7	19,3	3	0,09	35	30	1,6	2,5	1,78	2,35	1,93	2,57
8	19,2	8,3	0,08	31	30	1,5	2,5	1,69	2,5	1,93	2,51
9	19,1	8,6	0,07	34	26	1,7	2,65	1,78	2,5	1,91	2,57
10	19,5	8,4	0,16	34	24	1,7	2,65	1,77	2,5	1,91	2,51
11	19,5	9	0,2	37	30	1,7	2,7	1,8	2,3	2	2,67
12	18,9	7,6	0,14	35	30	1,5	2,55	1,73	2,3	1,9	2,6
13	18,9	6,3	0,12	33	30	1,5	2,55	1,68	2,35	1,9	2,6
14	18,7	6,1	0,15	30	22	1,6	2,4	1,68	2,38	1,95	2,6
15	19,1	3,8	0,16	31	25	1,6	2,3	1,65	2,39	1,95	2,54
16	19	3,6	0,11	28	29	1,5	2,5	1,65	2,42	1,94	2,48
17	19,3	3,3	0,12	30	29	1,7	2,6	1,68	2,41	1,94	2,45
18	18,5	2,5	0,05	26	21	1,4	2,3	1,6	2,3	1,8	2,4

## Машинобудування і зварювальне виробництво

19	18,9	5,7	0,07	32	30	1,6	2,3	1,71	2,5	1,95	2,6
20	19	5,2	0,09	33	30	1,6	2,6	1,71	2,5	1,98	2,6
21	18,9	4,6	0,11	35	28	1,6	2,5	1,68	2,4	1,98	2,5
22	19,3	4,3	0,18	36	28	1,6	2,5	1,67	2,4	1,97	2,5
23	19,1	4,1	0,13	34	28	1,7	2,6	1,68	2,42	1,97	2,5
24	19	4,8	0,09	36	27	1,6	2,6	1,78	2,41	1,97	2,65
25	19,1	5,5	0,14	34	29	1,5	2,55	1,78	2,4	1,87	2,67
26	19,4	4	0,16	29	30	1,5	2,65	1,75	2,4	1,88	2,57
27	19,4	3,5	0,2	27	26	1,4	2,6	1,75	2,5	1,85	2,57
28	18,7	3	0,12	34	29	1,6	2,4	1,73	2,3	1,85	2,55
29	18,9	6,5	0,14	37	30	1,6	2,7	1,73	2,33	1,85	2,55
30	19,2	7	0,17	33	26	1,6	2,6	1,7	2,41	1,93	2,5
31	19,3	2,5	0,15	35	30	1,6	2,6	1,7	2,4	1,93	2,5
32	18,9	4,5	0,11	31	29	1,7	2,5	1,63	2,4	1,93	2,6
33	18,6	3,5	0,07	33	28	1,5	2,4	1,65	2,4	1,93	2,6
34	18,5	5	0,16	30	30	1,7	2,5	1,63	2,5	1,95	2,6
35	19,1	3	0,13	28	25	1,5	2,4	1,61	2,5	1,95	2,61

Були проведені розрахунки отриманих рівнянь регресії, на основі яких побудовані графіки, що показують вплив кожного з факторів на твердість та відносну зносостійкість при наступних видах зносу: сухе тертя, абразивне та ударно-абразивне впливи.

Побудована квадратична модель дає можливість прогнозувати вплив кожного з легуючих елементів на твердість та зносостійкість наплавленого металу.

При збільшенні вмісту хрому в наплавленому металі твердість змінюється в межах малих значень. Це обумовлено тим, що з ростом вмісту хрому збільшується кількість карбидів, а також зростає кількість аустеніту в структурі наплавленого металу. При збільшенні вмісту нікелю з 3% до 10% твердість наплавленого металу знижується, що пояснюється збільшенням вмісту аустеніту в його структурі. При збільшенні вмісту азоту з 0% до 0,3% твердість наплавленого металу зростає. Це пояснюється утворенням нітридів алюмінію, хрому та ванадію в наплавленому металі. Вміст азоту не повинен перевищувати 0,3% в наплавленому металі, оскільки це призводить до крихкості та утворення пористості. Отримані дані показують, що хром позитивно впливає на зносостійкість наплавленого металу. Хром у досліджуваному інтервалі підвищує зносостійкість для кожної з наплавів. Позитивний вплив на стійкість до всіх трьох видів зносу обумовлений тим, що хром сприяє утворенню карбидів  $Cr_{23}C_6$  на межах зерен аустеніту, які мають підвищену твердість. При ударно-абразивному зносі важливу роль відіграє збільшення вмісту залишкового аустеніту під впливом хрому та підвищення його стабільності. Це дозволяє поглинати енергію удару та інтенсифікувати процес деформаційного мартенситного перетворення [21]. Таким чином, при ударно-абразивному зношуванні збільшення вмісту нікелю призводить до підвищення зносостійкості. Це можна пояснити впливом кількості залишкового аустеніту, який при інтенсивному навантаженні проходить динамічне мартенситне перетворення. При малих навантаженнях, таких як сухе тертя та абразивний знос, утворення мартенситу деформації відбувається менш інтенсивно, що призводить до зниження твердості та зносостійкості наплавленого металу. У таблиці 3 наведено результати складів наплавленого металу з найбільшими показниками розрахункової зносостійкості при трьох видах зносу, на основі математичної моделі та експериментальних даних.

## Машинобудування і зварювальне виробництво

Таблиця 3 – Склад наплавленого металу з найбільшими розрахунковими показниками

Порошкова проволочка	Розрахункова відносна зносостійкість			Вміст елементів, %			Розрахункова твердість, HRC
	$\epsilon$	$\epsilon_a$	$\epsilon_{y-a}$	Cr	Ni	N	
X20H10Г6 (Еталон)	1	1	1	20	10	-	21
X19H4Г10	1,17	1,29	1,41	19	4	-	24
X19H3Г10АТ (N – 0,075%)	1,36	1,58	1,71	19	3	0,075	26
X19H3Г10АТ (N – 0,15%)	1,55	1,69	1,89	19	3	0,15	28
Порошкова проволочка	Експериментальна відносна зносостійкість			Вміст елементів, %			Експериментальна твердість, HRC
	$\epsilon$	$\epsilon_a$	$\epsilon_{y-a}$	Cr	Ni	N	
X20H10Г6 (Еталон)	1	1	1	20	10	-	23
X19H4Г10	1,2	1,32	1,46	19	4	-	24
X19H3Г10АТ (N – 0,075%)	1,4	1,62	1,76	19	3	0,075	27
X19H3Г10АТ (N – 0,15%)	1,6	1,71	1,89	19	3	0,15	29

### ВИСНОВКИ

На основі отриманих даних можна зробити висновок, що побудована квадратична математична модель повністю описує твердість та зносостійкість наплавленого металу, виготовленого за допомогою розроблених порошкових проволочок, та в повній мірі відповідає результатам, отриманим експериментальним шляхом. Це підтверджує її адекватність реальним процесам, що відбуваються в наплавленому металі.

1. На основі літературних та експериментальних даних розроблена математична модель впливу легуючих елементів хрому, нікелю та азоту на твердість та зносостійкість наплавленого металу, що містить метастабільний аустеніт.

2. Достовірність отриманої математичної моделі підтверджена результатами досліджень наплавленого металу в лабораторних умовах ДВНЗ «ПДТУ» з використанням необхідного обладнання.

#### Список використаних джерел

1. Лившиц Л.С. Основы легирования наплавленного металла / Л.С. Лившиц, Н. А. Гринберг, Э. Г. Куркумелли // М. : Машиностроение, 1969. 188 с.
2. Рябцев И.А. Наплавка деталей машин и механизмов / И.А. Рябцев // К. : Екотехнология, 2004. 160 с.
3. Малинов Л.С. Ресурсосберегающие экономнолегированные сплавы и упрочняющие технологии, обеспечивающие эффект самозакалки / Л.С.Малинов, В.Л. Малинов // Мариуполь : изд. «Рената», 2009. 568 с.
4. Малинов Л.С. Упрочнение нестабильных аустенитных Cr-Mn-N сталей / Л.С. Малинов, Т.Д. Эйсмонт. // Изв. АН СССР. Металлы, 1969. №2, с. 114-120.

## Машинобудування і зварювальне виробництво

5. Малинов Л.С. Разработка и исследование новой порошковой ленты для наплавки колес мостовых кранов / Л.С. Малинов, А.П. Чейлях, Е.А. Харланова // Сварочное производство, 1995. №10, 22с.
6. Титаренко В.В. Опыт совместных работ ОАО «Запорожсталь» и ОП «Реммаш» в разработке и внедрении новых наплавочных материалов / В.В. Титаренко, Г.В. Хоменко, В.И. Титаренко, А.В. Титаренко // Сборник работ 2-ой научно-практической конференции «Модернизация и переоснащение предприятий. Эффективные технологии ремонта и восстановления деталей». В рамках Международного промышленного форума «УкрИндустрия - 2006», Днепропетровск 11.10.2006. Экспоцентр «Метеор», с. 39-43.
7. Малинов Л.С. Повышение абразивной и ударно-абразивной износостойкости хромомарганцевых сталей / Л.С. Малинов // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost', 2001. №2, с. 54-56.
8. Разиков М.И. Сварка и наплавка кавитационной стали марки 30X10Г10 / М.И. Разиков, В.П. Ильин. М.: НИИМАШ, 1964. 35 с.
9. Лившиц Л.С. Основы легирования наплавленного металла / Л.С. Лившиц, Н.А. Гринберг, Э.Г. Куркумелли. М.: Машиностроение, 1984. 103 с.
10. Малинов В.Л. Разработка состава порошковой проволоки, обеспечивающей эффект самозакалки при эксплуатации и внедрение ее для наплавки крановых колес / В.Л. Малинов, Л.С. Малинов. Отчет о научно-исследовательской работе, 2009. 66 с.
11. Разиков М.И. О выборе наплавочного материала, стойкого при кавитационном нагружении / М.И. Разиков, Б. А. Кулишенко // Сварочное производство. 1967. №7, с. 10-12.
12. Уманский В.Б. Упрочнение деталей металлургического оборудования / В.Б. Уманский, А. А. Костенко, Ю. Г. Худик. М. : Металлургия, 1991. 176 с.
13. Потехин Б.А. Вклад мартенситного превращения при деформации в пластичность метастабильных аустенитных сталей // ФММ. 1979. т.48, вып. 5, с. 1065-1075.
14. Литвиненко Арьков В.Б. Исследование влияния азота и нитридообразующих элементов на структуру и износостойкость наплавленного металла / В. Б. Литвиненко Арьков // 8-я Российская конф. молод. научн. сотр. и аспирантов. «Физико-химия и технология неорг. материалов», Москва, 1518 ноября 2011. М., 2011. с. 599-600.
15. Цырлин Э.С. Азотирование мартенситностареющей стали Н18К9М5Т / Э.С. Цырлин // МиТОМ. 1979. №9, с. 22-25.
16. Лахтин Ю.М. Азотирование мартенситностареющей стали / Ю.М. Лахтин, Э.С. Цырлин. // ФиХОМ. 1973. №1, с. 101.
17. Коротич И.К. Поверхностное упрочнение малоникелевых мартенситностареющих сталей методом азотирования и цементации / И.К. Коротич, Л.С. Малинов, К.Н. Соколов и др. // Тез. докл. Второй Всесоюз. науч. конф. «Химико-термическая обработка металлов и сплавов». Минск. 1974. С.210-211.
18. Малинов Л.С. Хромомарганцевые стали с мартенситными превращениями при охлаждении и/или деформации. / Л.С. Малинов, В.Л. Малинов. // Ресурсосберегающие экономнолегированные сплавы и упрочняющие технологии, обеспечивающие эффект самозакалки. 2009. с. 243-288.
19. Влияние дополнительного легирования метастабильных аустенитных сталей на эксплуатационную стойкость / С.С. Черняж // Изв. вузов. Черная металлургия, 1993. №6. с. 48-52.
20. Филиппов М.А. Стали с метастабильным аустенитом / М.А. Филиппов, В. С. Литвинов, Ю. Р. Немировский. М. : Металлургия, 1988. 256 с.
21. Попов В.С. Износостойкость прессформ огнеупорного производства / В.С. Попов, Н.Н. Брыков, Н.С. Дмитриченко // М.: Металлургия, 1971. 160 с.



## OPTIMIZATION OF POWDER WIRE COMPOSITION THROUGH MATHEMATICAL MODELING OF THE INFLUENCE OF CHEMICAL ELEMENTS ON THE OPERATIONAL PROPERTIES OF THE WELDED METAL

*The problem of resource conservation is one of the most important, as tens of thousands of tons of metal are used annually in various industries to manufacture spare parts and replace rapidly worn components. This requires significant labor costs, leads to increased downtime of equipment, the need for replacing worn-out parts, and a reduction in the productivity of machines and devices. Increasing the wear resistance and service life of equipment is an important task in production. One effective way to address this issue is through the restoration of machine parts and tools and extending their service life by means of arc welding. In many cases, scarce alloying materials are used for this purpose, making the process costly. A solution is the development of new cost-effective alloyed welding materials that improve operational properties. In this context, the study investigates the possibilities of creating wear-resistant welding materials that provide the welded metal with the property of dynamic self-strengthening during operation, which emphasizes the relevance and importance of this direction for various industries. Research methods: the study employed metallographic analysis, chemical and X-ray spectral analysis of the welded metal, hardness measurements, comprehensive wear resistance tests under dry friction, abrasive, and impact-abrasive wear conditions, as well as mathematical modeling of the Fe-Cr-Mn-Ni-N welding metal system.*

**Keywords:** powder wire, austenite, wear resistance, alloying, arc welding, carbides, nitrides, mathematical modeling.

Стаття надійшла 10.10.2024р.

УДК 621.791.052

[doi.org/10.31498/2522-9990282024318367](https://doi.org/10.31498/2522-9990282024318367)

Захарова І.В., Студенікін Д.А.

## ВПЛИВ ПРОЦЕСІВ ТЕРМООБРОБКИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ У ВИРОБНИЦТВІ ТРУБ ЗАДЛЯ ВАЖЛИВИХ СЕРЕДОВИЩ

*Трубопроводи є одним з основних елементів інфраструктури атомної електростанції (АЕС), оскільки вони забезпечують транспортування різноманітних середовищ (води, пари, пароводяних сумішей, повітря тощо) між різними частинами станції [3,4].*

*Для трубопроводів насиченого пара, які йдуть до турбін, використовують сталі типу 12Х1МФ, оскільки вони здатні витримувати високі температури та тиски, а також мають високу корозійну стійкість [1]. Сталь 12Х1МФ є оптимальним вибором для систем, що транспортують важливі середовища.*

*Для визначення ролі термообробки після зварювання проведено серію експериментів, що включали зварювальні випробування, випробування з термообробки після зварювання.*

*Отримані результати дозволяють детальніше оцінити вплив різних режимів термообробки на структурні та механічні властивості зварних з'єднань, що є важливим для підвищення надійності та довговічності продукції з цієї сталі.*

*Наявність залишкових напружень, що виникають після процесу зварювання, сприяє утворенню корозійних тріщин та знижує стійкість металу до втомного пошкодження. У*