

УДК 669.28:519/87

<https://doi.org/10.26661/2071-3789-2024-1-2-11>

**Григор'єв Станіслав Михайлович**, професор, доктор технічних наук, Запорізький національний університет. ORCID: 0000-0002-3875-8880

**Скачков Віктор Олексійович**, професор, доктор технічних наук, Запорізький національний університет. ORCID: 0000-0002-4447-4641

**Карпенко Ганна Володимирівна**, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет. ORCID: 0000-0003-3504-0283

**Крутьєв Микола Іванович**, здобувач PhD, Запорізький національний університет

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ВИРОБНИЦТВА НІКЕЛЬ-МОЛІБДЕНОВОЇ ЛІГАТУРИ

В роботі виконано розробка та оптимізація багатофункціональної системи залежностей техніко-економічних показників виробництва нікель-молібденової лігатури і використання її при виплавці прецизійного сплаву з використанням техногенних відходів різних джерел утворення. Знайдені та досліджені оптимальні значення техніко-економічних показників і видаткових коефіцієнтів, в результаті чого встановлено підвищення якості нікель-молібденової лігатури з найбільш вигідним вмістом легувальних і розкислювальних елементів в ній та зниження собівартості виплавки прецизійного сплаву з її використанням.

З метою досягнення оптимальних властивостей цільової Ni-Mo лігатури прецизійних сплавів з урахуванням комплексного впливу складу шихти на зниження собівартості переділу її виплавки, підвищення ступеня використання техногенних відходів, зниження витратних коефіцієнтів нікелю і молібдену використовували регресійний аналіз.

Узагальнюючим методом найменших квадратів на основі показників промислових випробувань розроблена математична модель залежностей підвищення ступеня використання техногенних відходів різних джерел утворення і зниження витратних коефіцієнтів нікелю і молібдену при виплавці прецизійних сплавів від вмісту 10 складових в шихті для її виплавки. Встановлена висока техніко-економічна ефективність виробництва і використання нового легуючого і розкислюючого матеріалу.

Ключові слова: нікель-молібденова лігатура, прецизійні сплави, техногенні відходи, ресурсозбереження, економічна ефективність, оптимізація, математичне моделювання.

*Вступ.* Україна має обмежені можливості використання власної мінерально-сировинної бази для виробництва легувальних матеріалів на основі рідкісних і тугоплавких елементів.

Потреба в них задовольняється імпортними постачаннями з за кордону. Особливо ця проблема загострена в останній період у зв'язку зі стрімким зростанням цін на світовому ринку споживання. Тому розробка вітчизняних ресурсозберігаючих методів виробництва сплавів і лігатур, тим більше, з паралельною утилізацією відходів, які містять ці елементи, являє собою практичний промисловий та науковий інтереси.

Дефіцит фінансових коштів для технологічного розвитку і організації виробництва на більшості металургійних підприємств ускладнює впровадження технологій, що сприяють скороченню техногенних відходів і викидів шкідливих речовин [1].

Орієнтація на переважно екстенсивне використання природних ресурсів економічно виправдане недалекому минулому, в сучасних умовах не тільки недоцільна, але й неможлива. Доступність та порівняна дешевизна природних ресурсів, що мала місце в період екстенсивного економічного зростання не стимулювала формування прогресивної з сучасних позицій технологічної структури металургії, комплексне використання сировини та матеріалів, що призвело до надмірної енерго- та матеріалоємності кінцевого продукту. Ці тенденції проявляються в металургії рідкісних металів та легувальних матеріалів на їх основі. В нинішній період ця проблема посилюється відсут-

ністю сировинних джерел для виробництва тугоплавких легувальних матеріалів, а її дефіцит поповнюється імпортними поставками.

Ситуація, яка склалась з утворюваними відходами та їх переробкою, характеризується низьким ступенем використання коштовних дефіцитних рідкісних та тугоплавких елементів, а також відсутністю на практиці надійних технологій їх утилізації з техногенних відходів. Це, в свою чергу, знижує ефективність виробництва металопродукції [1, 2].

Одним з найбільш перспективних напрямків підвищення ефективності підприємства металургійної продукції є утилізація заліза та легувальних елементів. Існує певний досвід з добування цінних компонентів та легувальних елементів. Він підтверджує високу економічну ефективність переробки техногенних відходів, отриманих при обробці металів та накопичень в очисних спорудах. У цьому аспекті величезними потенційними можливостями зі створення мало та безвідходних процесів й утилізації легувальних елементів володіє порошкова металургія [1–3].

Аналіз формування безвідходних технологій виробництва нових легувальних матеріалів із рудних концентратів та утилізації цінних елементів з техногенних відходів у вітчизняній та зарубіжній практиці свідчать про їх високу ефективність [4].

*Аналіз джерел інформації і постановка проблеми.* Сучасне становище металургійного виробництва характеризується утворенням великої кількості техногенних відходів, які накопичуються у відвалах і займають площі можливих оброблювальних земель, забруднюючи прилеглі території [1–4].

Особливо шкідливим для навколишнього середовища є присутність у відходах важких металів до яких відносяться хром, нікель, молібден, вольфрам та інші, які забруднюють землі і підземні води [5, 6].

У разі використання рідкодисперсних оксидних відходів, не забруднених супутніми домішками сірки та фосфору, економічно доцільна металізація в гетерогенній системі без появи рідких фаз [1, 7].

У випадку використання забруднених супутніми шкідливими домішками відходів, як правило, здійснюється рафінувальна плавка, як наприклад, утилізація коштовних елементів та заліза з техногенних відходів (окалина, пилу, шламу так ін.) у рамках проекту ZEWA [8] та виробництво лігатур і сплавів на основі різних технологічних відходів та забрудненої сировини методом відновлення оксидів металів з залізовуглецевому розплаві [1].

Основним способом одержання та використання забрудненої вторинної сировини з відходів рідких джерел утворення є рафінувальна плавка в системі рідковажних реакцій з застосування шлакоутворювачів, інертних газів, вакууму та їх поєднання. Однак такі способи утилізації легувальних елементів не забезпечують очікуваної на практиці ефективності, що обумовило вирішення проблем вилучення ефективності ресурсо- та енергозбереження з техногенних відходів та покращення їх якості [1, 9].

*Мета і завдання дослідження.* Мета цієї частини напрямку – кількісне виявлення факторів, які набули розвитку і вимагають на ефективність утилізації тугоплавких елементів при температурах рідкофазних реакцій при виробництві нікель-молібден-вмісних прецензійних сплавів, розробленими передовими засобами. Одним із завдань є побудова багатофункціональної моделі системи залежностей техніко-економічних показників виробництва Ni-Mo лігатури для виплавки прецензійних сплавів [10]. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

– для зниження безповоротних втрат нікелю і молібдену у вигляді сублимації вищих оксидних з'єднань провести аналіз хімічних, фазових і рентгеноструктурних перетворень при виплавці лігатур в системі рідкофазних реакцій;

– розробити і оптимізувати математичну модель техніко-економічних показників виробництва Ni-Mo лігатури для виплавки прецензійних сплавів.

Хімічний склад вихідних компонентів лігатур для виплавки Ni-Mo прецензійних сплавів наведено в таблиці 1а та 1б.

*Методика проведення досліджень.* В промислових умовах проведено активний експеримент зі зміною технологічних (склад шихтових матеріалів наведений в таблиці 2) параметрів в межах, мас. %: окалина сплаву 79НМ 6,4–23,3; стружка силового шліфування металопродукції сплаву 79НМ 5,5–44,5; концентрат молібденовий марки КМо-2 1,0–8,8;

технічний закис нікелю 10,5–18,3; циклонний пил кремнію і/або відсів кристалічного кремнію 4,1–5,5; металевий марганець 1,1–6,0; деревне вугілля 9,3–12,5; алюмінієвий дрос 2,1–5,1; смола СПП 7,7–15,1; м'яке залізо типу «АрМКО» за ТУ 101139 – решта. Виплавку лігатури Ni-Mo проводили в електропечі ДСП-5 з основною футеровкою.

Рентгеноструктурний фазовий аналіз зразків, проводили на дифрактометрі «ДРОН-8». Мікроаналіз зразків отримані на растровому мікроскопі «РЕН-106И». Мікроскоп виконаний з системою рентгенівського мікроаналізу з визначенням хімічного синтезу окремих ділянок поверхні зразків.

Таблиця 1а – Хімічний склад компонентів, які використовувались у промислових випробуваннях способу виплавки лігатури для нікель-молібденових прецизійних сплавів

| Компоненти шихти   | Вміст компонентів, мас % |                          |           |       |           |           |
|--|--------------------------|--------------------------|-----------|-------|-----------|-----------|
|  | C                        | Si                       | Mn        | S     | P         | Ni        |
| Окалина сплаву 79НМ                                      | ≤0,10                    | 0,25-0,55                | 0,44      | 0,017 | 0,015     | 6,35      |
| Стружка силового шліфування металопродукції сплаву 79НМ  | 0,02-0,09                | 0,39-0,45                | 0,53-0,79 | ≤0,37 | 0,21-0,23 | 72,6-76,5 |
| Концентрат молібденовий марки КМо-2                      |                          | 0,35 (SiO <sub>2</sub> ) |           | 0,21  | 0,01      |           |
| Технічний закис нікелю                                   |                          |                          |           |       |           | 77,3      |
| Циклонний пил кремнію і/або відсів кристалічного кремнію | 0,14                     | 98,70                    |           |       |           |           |
| Металевий марганець                                      | 0,110-0,210              |                          | 95,3-95,7 | 0,04  | 0,35      |           |
| Деревне вугілля  | 78,8-81,7                |                          |           |       |           |           |
| Алюмінієвий дрос   | ≤0,01                    |                          |           | ≤0,01 | ≤0,01     |           |

Фазовий склад зразків методом рентгеноструктурного аналізу з використанням монохромного випромінювання  $\text{CoK}\alpha$   $\lambda=0,178897\text{Å}$  з Fe фільтром. Вимірювання виконувалося при напрузі на трубці  $U=30\text{Кв}$  і анодному струмі  $I=10\text{Ма}$ . Склад фаз визначався за допомогою комплексу програм PDWin 2,0.

Ділянки дифрактограм досліджуваних зразків свідчать, що вихідна окалина сплаву 79НМ представлена сполуками  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  і незначної частини  $\text{FeO}$ . Нікель і молібден присутні у вигляді твердих розчинів, які мають властивість необмеженої розчинності в залізі і утворюють безперервний ряд на основі  $\gamma$ -структур ( $\gamma\text{-Fe}$ ) [1,2].

Цільова Ni-Mo лігатура складається з  $\gamma\text{-Fe}$  і твердих розчинів Ni і Mo в  $\gamma\text{-Fe}$  і  $\text{FeNi}$ . Ці результати при виплавці лігатури Ni-Mo для прецизійних сплавів і утилізації окалини сплаву 79НМ. При утилізації легувальних елементів із техногенних відходів із відходів прецизійних сплавів 79НМ вихідна окалина представлена сполуками  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , фрагментарно  $\text{MoO}_3$  і твердим розчином NiO в оксидах заліза. У сплавах Fe-Ni утворюються безперервні розчини на основі заліза  $\gamma$  – структури, кристалічна решітка яких складається з кристалічної решітки Fe, заповненої атомами нікелю.

Цільовий продукт складається з  $\text{FeNi}$ ,  $\gamma\text{-Fe}$  і твердого розчину молібдену в  $\gamma\text{-Fe}$ . Найвний в кінцевому продукті в незначних кількостях  $\text{FeO}$  і  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Проведені дослідження підтвердили відсутність елементів і сполучень, що володіють високою швидкістю сублімації. Це дає змогу для організації промислового виробництва Ni-Mo лігатури не вживати додаткових заходів, що запобігають безповоротним втратам легувальних елементів у вигляді вищих оксидних з'єднань рідкісних металів, які сублімують при відносно невисоких температурах.

Нетрадиційний напрям зниження дефіциту нікелю полягає у використанні високо контрольованих відходів виробництва корозійностійких матеріалів і прецизійних сплавів на нікелевій основі при отриманні нікелевих лігатур, що задовольняють високим вимогам спеціальної металургії. Ці лігатури можуть застосовуватися при виплавці спеціальних сплавів на нікелевій основі, а також як легувальні елементи нікелю в різних сферах його використання.

Таблиця 16 – Хімічний склад компонентів, які використовувались у промислових випробуваннях способу виплавки лігатури для нікель-молібденових прецизійних сплавів

| Компоненти шихти   | Вміст компонентів, мас % |       |           |                |           |   |  |
|--|--------------------------|-------|-----------|----------------|-----------|---|--|
|  | Mo                       | Ti    | Cu        | O <sub>2</sub> | Al        | Fe  | Домішки  |
| Окалина сплаву 79НМ                                      | 2,99                     | ≤0,14 | ≤0,18     | 21,7           |           | Основа                                    | Fe <sub>n</sub> O <sub>m</sub><br>SiC  |
| Стружка силового шліфування металопродукції сплаву 79НМ  | 3,25-3,50                | ≤0,22 | 0,11-0,17 | 0,21-1,21      | ≤0,28     | решта                                     | MoC, SiC,<br>SiO <sub>2</sub>  |
| Концентрат молібденовий марки КМо-2                      | 54,5                     |       | 0,01      | 25,7           |           | 2,11<br>Fe <sub>n</sub> O <sub>m</sub>    | 4,1<br>WO <sub>3</sub> ,<br>Na <sub>2</sub> O,<br>CaO  |
| Технічний закис нікелю                                   |                          |       | 20,15     |                |           | FeO<br>0,12                               | CaO, CoO,<br>CuO   |
| Циклонний пил кремнію і/або відсів кристалічного кремнію |                          |       |           |                |           |   | Решта, SiC,<br>MgC   |
| Металевий марганець                                      |                          |       |           |                |           | решта                                     | +Ca;<br>+Mg;<br>≤0,25  |
| Деревне вугілля  |                          |       |           |                |           |   | * решта  |
| Алюмінієвий дрос   |                          |       |           |                | 17,7-25-5 | Fe <sub>n</sub> O <sub>m</sub><br>1,1-2,3 | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ;<br>Al <sub>n</sub> U <sub>m</sub> ;<br>CaO;<br>SiO <sub>2</sub> |
| Смола СПП  |                          |       |           |                |           |   | **C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>  |

Примітка 1: \* – у водневій суміші.

Примітка 2: \*\* – C<sub>n</sub>H<sub>m</sub> (важкі фракції перегонки нафти)

Таблиця 2 – Досліджувані техніко-економічні показники лігатури для легування і розкислення Ni-Mo прецизійних сплавів (склад шихти)

| Номер лігатури | Фактори             |   |                                     |                        |  |                     |                 |                  |                |  |   |  |
|----------------|---------------------|---|-------------------------------------|------------------------|--|---------------------|-----------------|------------------|----------------|--|---|--|
|                | Окалина сплаву 79НМ | Стружка силового шліфування металопродукції сплаву 79НМ | Концентрат молібденовий марки КМо-2 | Технічний закис нікелю | Циклонний пил кремнію і/або відсів кристалічного кремнію | Металевий марганець | Деревне вугілля | Алюмінієвий дрос | Смола СПП      | М'яке залізо типу «АрМКО» за ТУ 101139 | Доля використання техногенних відходів, % | Доля заміщення Ni, Mo техногенними відходами |
|                | x <sub>1</sub>      | x <sub>2</sub>  | x <sub>3</sub>                      | x <sub>4</sub>         | x <sub>5</sub>   | x <sub>6</sub>      | x <sub>7</sub>  | x <sub>8</sub>   | x <sub>9</sub> | x <sub>10</sub>                        | y <sub>1</sub>                            | y <sub>2</sub>                               |
| 1              | 7,3                 | 43,5  | 1,7                                 | 11,4                   | 4,7  | 5,5                 | 9,7             | 2,3              | 9,3            | 15,8                                   | 44,4                                      | 34   |
| 2              | 9,1                 | 37,9  | 2,8                                 | 11,8                   | 4,8  | 4,9                 | 9,8             | 2,5              | 9,5            | 6,9                                    | 43,0                                      | 34   |
| 3              | 9,9                 | 33,3  | 3,3                                 | 12,9                   | 4,9  | 4,4                 | 9,8             | 2,6              | 9,7            | 9,2                                    | 42,7                                      | 34   |
| 4              | 12,5                | 29,5  | 4,1                                 | 13,2                   | 5,0  | 3,9                 | 9,9             | 2,7              | 10,1           | 9,1                                    | 40,9                                      | 34   |
| 5              | 14,7                | 27,7  | 4,7                                 | 13,9                   | 5,1  | 3,7                 | 10,3            | 3,1              | 10,4           | 6,7                                    | 37,0                                      | 33   |
| 6              | 15,3                | 24,5  | 5,0                                 | 14,9                   | 5,1  | 3,4                 | 10,7            | 3,4              | 11,0           | 6,7                                    | 33,3                                      | 33   |
| 7              | 17,4                | 19,4  | 6,7                                 | 15,5                   | 5,2  | 2,9                 | 11,0            | 3,7              | 11,5           | 6,7                                    | 32,8                                      | 33   |
| 8              | 19,1                | 15,9  | 7,1                                 | 16,1                   | 5,3  | 2,7                 | 11,3            | 4,0              | 12,0           | 6,5                                    | 31,7                                      | 30   |
| 9              | 21,0                | 11,7  | 8,8                                 | 16,7                   | 5,3  | 1,9                 | 11,5            | 4,3              | 12,4           | 6,4                                    | 29,3                                      | 28   |
| 10             | 22,2                | 7,7   | 8,1                                 | 17,3                   | 5,4  | 1,8                 | 11,7            | 4,5              | 12,9           | 8,9                                    | 28,4                                      | 27   |
| 11             | 23,3                | 5,5   | 8,4                                 | 18,3                   | 5,5  | 1,3                 | 11,9            | 4,7              | 13,8           | 7,3                                    | 27,9                                      | 25   |

Досліджені і випробувані розробки можуть бути реалізовані на вивільнених плавильних потужностях чорної та кольорової металургії без будь-яких конструкційних доробок, що відкриває перспективи впровадження багатьох технологічних проєктів без використання значних капітальних вкладень. При цьому, повинні враховуватися такі нетипові фактори, як форма придатності у відходах з'єднань, наявність і концентрація супутніх шкідливих домішок, що знижують практичну цінність тугоплавких елементів, тощо.

Завдання комплексного легування з одночасною утилізацією металургійних відходів досягається тим, що шихта включає металевий порошок і матеріал, який містить оксидні з'єднання легувальних елементів (окаліну прецизійних сплавів, рудні концентрати і/або технічно чисті оксиди цільових елементів), вуглецевий відновник, металевий марганець і алюміній у вигляді дроту. З метою досягнення оптимальних властивостей цільової лігатури Ni-Mo прецизійних сплавів з урахуванням комплексного складу шихти на зниження собівартості переділу виплавки лігатури для легування і розкислення сплаву використовувався регресійний аналіз виплавки Ni-Mo вміщуючих прецизійних сплавів та зниження витратних коефіцієнтів нікелю і молібдену, % (у<sub>2</sub>) від вмісту зазначених компонентів шихти для її виплавки, % мас.

Регресивну рівняння задавалось у вигляді:

Регресивну рівняння задавалось у вигляді:

$$y_i = \sum_{j=1}^{10} (C_i^0 + C_i^1 x_j + C_i^2 x_j^2),$$

де  $C_i^0$ ,  $C_i^1$ ,  $C_i^2$  – коефіцієнти регресії, які визначають вільну константу, лінійний та квадратичний вклад факторів (відповідно до таблиці 2);

$y_1$  – доля використання техногенних відходів, % мас;

$y_2$  – доля заміщення Ni, Mo техногенними відходами.

Данні для розрахунку коефіцієнтів  $y_1$  та  $y_2$  в таблиці 3. Аналізуючи наведені данні представлені в таблиці 3 визначено граничні значення вмісту компонентів шихти які представлені в таблиці 4.

Дослідженням встановлено значне підвищення техніко-економічної ефективності використання нового легувального і розкислювального матеріалу – Ni-Mo лігатури при виплавці прецизійних сплавів на нікелевій основі:

– на 2-11 % мас підвищено вихід придатного при виплавці лігатури за рахунок використання більш дешевих рудних концентратів і техногенних відходів власного виробництва, які представлені оксидними сполуками, завдяки відновлюючих та розкислюючих процесів за межі основного сталеплавильного пічного агрегату;

Таблиця 3 – Коефіцієнти регресії для прогнозування долі використання техногенних відходів ( $y_1$ ) та доля заміщення Ni, Mo техногенними відходами  $y_2$

| № з/п | $C_i^0$ | $C_i^1$ | $C_i^2$ | $C_i^0$ | $C_i^1$ | $C_i^2$ |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|       | $y_1$   |         |         | $y_2$   |         |         |
| 1     | 0,0059  | 0,8726  | 0,0198  | 0,0390  | 0,413   | -0,056  |
| 2     | 0,0104  | 1,4378  | 0,0242  | 0,1019  | 1,077   | -0,055  |
| 3     | 0,0336  | 4,5555  | 0,0242  | 0,3961  | 4,161   | -0,024  |
| 4     | 0,0247  | -3,3092 | -0,0132 | 0,2333  | -2,452  | -0,013  |
| 5     | 0,0014  | 0,2907  | -0,0164 | 0,0078  | -0,082  | -0,016  |
| 6     | 0,0037  | 0,5230  | -0,0205 | 0,0552  | -0,585  | -0,021  |
| 7     | 0,0002  | -0,3502 | -0,0256 | 0,0076  | -0,081  | -0,026  |
| 8     | 0,0044  | -0,6772 | -0,0320 | 0,0225  | -0,237  | -0,032  |
| 9     | 0,0045  | 0,6024  | -0,0400 | 0,0705  | -0,741  | -0,040  |
| 10    | 0,0149  | 2,0827  | -0,0500 | 0,0609  | -0,641  | -0,050  |

– знижено на 3–6 % мас безповоротних втрат нікелю і молібдену за рахунок підвищеного вмісту алюмінію і нікелю в лігатурі;

– за рахунок підвищеного вмісту відносно стехіометричного розкладу вуглецевого відновника, а від так утворення додаткової відновлювальної газової фази CO, скорочено час розчинення Ni і Mo в розплаві лігатури.

Таблиця 4 – Оптимальні області досліджуваних техніко-економічних показників отримання і використання лігатури Ni-Mo для регулювання і розкислення прецизійних сплавів

| Межі оптимальних значень факторів | Фактори                    |  |  |                               |   |                            |                        |                         |                  |  |
|-----------------------------------|----------------------------|--|--|-------------------------------|---|----------------------------|------------------------|-------------------------|------------------|--|
|                                   | Окалина сплаву 79НМ, % мас | Стружка силового шліфування металопродукції сплаву 79НМ, % мас | Концентрат молібденовий марки КМо-2, % | Технічний закис нікелю, % мас | Циклонний пил кремнію і/або кристалічного кремнію, % мас. | Марганець металевий, % мас | Деревне вугілля, % мас | Алюмінієвий дрос, % мас | Смола СПШ, % мас | М'яке залізо типу «АрМКО за ТУ 14-101139-79 з вмістом вуглецю не більше 0,03 % мас, молібдену 0,05 % мас, кисню не більше 0,03 % мас |
|                                   | 7,3                        | 5,5  | 1,7                                    | 11,4                          | 4,7   | 1,3                        | 9,7                    | 2,3                     | 9,3              | Решта  |
|                                   | 23,3                       | 43,7   | 2,4                                    | 18,3                          | 5,5   | 5,5                        | 11,9                   | 4,7                     | 13,8             | Решта  |

*Висновки.* Проведена робота з побудови математичної моделі дозволила виявити та дослідити оптимальні області техніко-економічних показників та витратних коефіцієнтів в результаті чого виявлено можливість підвищити якість сплаву для легування та розкислення розплаву з найбільш вигідним вмістом легувальних і розкислювальних елементів в ньому та зниження собівартості виплавки сплаву з його використання. Оптимальний вміст інгредієнтів в складі шихти % мас: окалина сплаву 79НМ-7,3-23,3; стружка силового шліфування металопродукції 79НМ-5,5-43,7; концентрат молібденовий марки КМо-2-1,7-8,4; технічний закис нікелю 11,4-18,3; циклонний пил кремнію і/або відсів кристалічного кремнію 4,7-5,5; металевий марганець 1,3-5,5; деревне вугілля 9,7–11,9; алюмінієвий дрос 2,3-4,7; смола 9,3-13,8; м'яке залізо типу «АрМКО» за ТУ-14-101139.

Дослідження і аналіз техніко-економічних показників виробництва Ni – Mo прецизійних сплавів підтвердило такі переваги в порівнянні з прототипом:

- підвищення ступеня використання техногенних відходів різних джерел утворення з 27,9 до 44,4 %;
- зниження витратних коефіцієнтів нікелю та молібдену з 25 до 34 %;
- зниження часу повного розчинення Ni і Mo із лігатури при виплавці прецизійного сплаву на 5-10%;
- зниження собівартості виплавки Ni і Mo вмісних сплавів на 34-37 %;
- зниження безповоротних витрат Ni і Mo у вигляді сублимації вищих оксидних з'єднань 3-6%;
- підвищення виходу придатного на 2-11%.

### Бібліографічний перелік

1. Григор'єв С.М., Скачков В.О., Бережна О.Р. Порошкова металургія легувальних і композиційних матеріалів : монографія. Запоріжжя : Запорізький національний університет, 2017. 738 с.
2. Григор'єв С.М., Петрищев А.С., Шишкова Г.А. Оптимізація техніко-економічних показників технології виробництва сплаву «СІР». *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*, 2011. №2. С. 72-78.
3. Острик П.М., Гасік М.І., Пирог В.Д. Металургія губчастих і порошкових лігатур. Київ : Техніка, 1992. 128 с.
4. Григор'єв С.М. Економічна стратегія і тактика ресурсо- та енергозбереження в металургії тугоплавких матеріалів. *Металургія*, 1998. №1. С. 17-23.

5. Петрищев А.С. Оптимизация технико-экономических показателей технологии металлизации окалины быстрорежущих сталей. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*, 2012. №1. С. 71-76.
6. Ахметов А.Б., Байсаков С.О., Ахтанова Р.Ш. Восстановление железа из железоуглеродных брикетов при выплавке стали в дуговых электропечах. *Сталь*, 2007. №8. С.39-42.
7. Фляйшандерль А., Женнари У., Борле Ж., Жимене М., Соррантино Ф., Дельбек Ж.-М., Грисвар К., Хоффманн Я., Калоенс И., Кубица К., Рубо Э., Рацлавски М. Zewa — новый металлургический процесс для производства ценных материалов из промышленных отходов. *Черные металлы*, 2005. №6. С. 33-40.
8. Петрищев А.С., Григор'єв С.М. Математична модель оптимізації техніко-економічних показників металізації окалини швидкоріжучих сталей. *Вісник приазовського державного технічного університету*, 2011. №2(23). С. 62-68.
9. Патент 148699 Україна, МПК C21C5/52 C22B5/14. Спосіб виплавки лігатури для нікель-молібденових сплавів. Григор'єв Станіслав Михайлович, Пилипенко Наталія Володимирівна, Гнатюк Євген Володимирович. Дата публікації відомостей про видачу патенту 08.09.2021 р.
10. Григор'єв С.М., Петрищев А.С. Сучасне ресурсозбереження в металургії спеціальних сталей (техніко-економічне обґрунтування) : монографія. Запоріжжя : Запорізький національний університет, 2016. 534 с.
11. Leont'ev L.I., Grigorovich, K.V., Kostina, M.V. The development of new metallurgical materials and technologies. Part 1. *Steel in Translation*, 2016. № 46 (1). P. 6 - 15.

### References

1. Grigoryev S.M., Skachkov V.O., Berezhna O.R. Powder metallurgy of alloying and composite materials: monograph. Zaporizhzhia: Zaporizhzhia National University, 2017. 738 p.
2. Grigoryev S.M., Petrishchev A.S., Shishkova G.A. Optimization of the technical and economic indicators of the "SIR" alloy production technology. *New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering*, 2011. No. 2. WITH. 72-78.
3. Ostryk P.M., Gasik M.I., Pierog V.D. Metallurgy of spongy and powder ligatures. Kyiv: Technika, 1992. 128 p.
4. Grigoriev S.M. Economic strategy and tactics of resource and energy saving in the metallurgy of refractory materials. *Metallurgy*, 1998. No. 1. P. 17-23.
5. Petryshev A.S. Optimization of the technical and economic parameters of the technology of metallization of slag of high-speed steels. *New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering*, 2012. No. 1. P. 71-76.
6. Akhmetov A.B., Baisakov S.O., Akhtanova R.Sh. Recovery of iron from iron-carbon briquettes during steel smelting in electric arc furnaces. *Steel*, 2007. № 8. P. 39-42.
7. Fleischanderl, A., Gennary, U., Borle, J., Zhimene, M., Sorrantino, F., Delbecq, J.-M., Grysvar, K., Hoffmann, J., Kaloens, I., Kubitsa, K., Roubo, E., Ratslavski, M. Zewa is a new metallurgical process for the production of valuable materials from industrial waste. *Black metals*, 2005. №6. P. 33-40.
8. Petrishchev A.S., Grigoriev S.M. Mathematical model of optimization of techno-economic indicators of metallization of slag of high-speed steels. *Bulletin of the Priazov State Technical University*, 2011. № 2(23). P. 62-68.
9. Patent 148699 Ukraine, IPC C21C5/52 C22B5/14. The method of smelting a ligature for nickel-molybdenum alloys. Stanislav Mykhailovych Grigoriev, Nataliya Volodymyrivna Pylypenko, Yevhen Volodymyrovych Hnatyuk. Date of publication of information on the issuance of a patent 09.08.2021.
10. Grigoriev S.M., Petrishchev A.S. Modern resource conservation in the metallurgy of special steels (technical and economic justification): monograph. Zaporizhzhia: Zaporizhzhia National University, 2016. 534 p.
11. Leont'ev L.I., Grigorovich, K.V., Kostina, M.V. The development of new metallurgical materials and technologies. Part 1. *Steel in Translation*, 2016. № 46 (1). P. 6 - 15.

**Hrigoriev Stanislav**, Professor, Doctor of Technical Sciences, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0002-3875-8880

**Skachkov Viktor**, Professor, Doctor of Technical Sciences, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0002-4447-4641

**Karpenko Hanna**, candidate of technical sciences, Zaporizhzhia National University. ORCID: 0000-0003-3504-0283

**Krutiev Mykola**, PhD candidate, Zaporizhzhia National University

#### **MATHEMATICAL MODELING OF TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS OF NICKEL-MOLYBDENUM LIGATOR PRODUCTION**

In the work, the development and optimization of a multifunctional system of dependencies of the technical and economic indicators of the production of nickel-molybdenum ligature and its use in the smelting of a precision alloy with the use of man-made waste from various sources of formation was carried out. The optimal values of technical and economic indicators and cost factors were found and investigated, as a result of which the quality improvement of the nickel-molybdenum ligature with the most favorable content of alloying and deoxidizing elements in it and the reduction of the cost of smelting a precision alloy with its use were established.

In order to achieve optimal properties of the target Ni-Mo ligature of precision alloys, taking into account the complex effect of the composition of the charge on reducing the cost of redistribution of its melt, increasing the degree of use of man-made waste, reducing the consumption coefficients of nickel and molybdenum, regression analysis was used.

Using the generalized method of least squares, based on the indicators of industrial tests, a mathematical model of the dependences of the increase in the degree of use of man-made waste from various sources of formation and the reduction of the consumption coefficients of nickel and molybdenum in the smelting of precision alloys on the content of 10 components in the charge for its smelting was developed. The high technical and economic efficiency of the production and use of the new alloying and deoxidizing material has been established.

**Key words:** nickel-molybdenum ligature, precision alloys, man-made waste, resource conservation, economic efficiency, optimization, mathematical modeling.