

УДК 658.52.011.56:621.77123-413

М.Г. ІЄВЛЄВ\*

## КОМПЛЕКСНЕ АВТОМАТИЗОВАНЕ КЕРУВАННЯ ЯКІСТЮ ПРОКАТУ НА ТОВСТОЛИСТОВОМУ СТАНІ

\*Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, м. Київ, Україна

**Анотація.** Якісна характеристика прокату — вектор параметрів, компонентами якого є механічні властивості, стан поверхні та геометричні розміри. Необхідні значення якісних параметрів прокату задаються ДСТУ та ТУ у вигляді обмежених (односторонньо або двосторонньо) інтервалів — допусків. Якісні параметри більшою або меншою мірою формуються в процесі прокатки і можуть бути описані відповідними математичними моделями. Такі моделі — переважно математичні залежності відповідного якісного показника від вектора параметрів режиму прокатки. Цілі автоматизованого управління прокаткою полягають у досягненні оптимізації співвідношення якісних показників для отримання максимального прибутку. У цих умовах може бути постановка задачі оптимізації за векторним критерієм. Однак при згортанні векторного критерію в скалярний, необхідного для вирішення задачі, виникає проблема визначення вагових коефіцієнтів різних показників, яка в загальному випадку зазвичай вирішується на рівні експертних оцінок. У результаті такого конструювання критерію ефективність оптимізації автоматичного управління за цим критерієм суттєво визначається досвідом експертів. Більш строго підійти до постановки задачі автоматизації, рішення якої забезпечувало б максимальну ефективність автоматизації, дозволяє декомпозиція об'єкта із загальної задачі автоматизації до ряду однокритеріальних. У статті розглянуті постановка та декомпозиція задачі комплексного автоматизованого керування якістю прокату на товстолистовому стані, наведено опис отриманих у результаті декомпозиції автономних задач управління, що забезпечують задані показники якості прокату. Викладені вище науково-технічні рішення можуть бути використані при розробці автоматизованих систем керування якістю прокату на ТЛС.

**Ключові слова:** декомпозиція, якість прокату, режими прокатки, товстолистовий стан, математичні моделі.

**Abstract.** Quality characteristics of rolled products represent a vector of parameters whose components include mechanical properties, surface condition, and geometric dimensions. The required values of the quality parameters for rolled products are specified by national standards (DSTU) and technical specifications (TU) as limited (one-sided or two-sided) tolerance intervals. Quality parameters are formed to a greater or lesser extent during the rolling process and can be described by corresponding mathematical models. Such models are primarily mathematical dependencies of the respective quality indicator on the vector of rolling mode parameters. Automated rolling control aims at optimizing the balance of quality indicators to achieve maximum profit. Under these conditions, an optimization problem with a vector criterion may be posed. However, when reducing the vector criterion to a scalar one, necessary for solving the problem, the issue of determining weighting coefficients for different indicators arises, which in general is usually resolved at the level of expert evaluations. As a result of such criterion construction, the efficiency of optimization for automatic control according to this criterion largely depends on the experts' expertise. A more rigorous approach to formulating the automation problem, whose solution would ensure maximum automation efficiency, is enabled by the decomposition of the object from the general automation problem into a set of single-criterion problems. The paper considers the formulation and decomposition of the problem of comprehensive automated quality control of rolled products on a heavy-plate mill. It presents a description of the autonomous control tasks obtained as a result of decomposition, which ensure the specified quality indicators of the rolled products. Scientific and technical solutions provided above can be used in the development of automated quality control systems for rolling on heavy-plate mills.

**Keywords:** decomposition, rolled product quality, rolling modes, heavy-plate mill, mathematical models.

## 1. Вступ

Якісна характеристика прокату — вектор параметрів, компонентами якого є механічні властивості, стан поверхні та геометричні розміри. Необхідні значення якісних параметрів прокату задаються ДСТУ та ТУ у вигляді обмежених (односторонньо або двосторонньо) інтервалів — допусків. Розглянуті якісні параметри більшою або меншою мірою формуються в процесі прокатки і можуть бути описані відповідними математичними моделями. Такі моделі — переважно математичні залежності відповідного якісного показника від вектора параметрів режиму прокатки.

*Метою статті є розгляд постановки та декомпозиції задачі комплексного автоматизованого керування якістю прокату на товстолистовому стані, опис отриманих у результаті декомпозиції автономних задач управління, що забезпечують задані показники якості прокату.*

## 2. Загальна постановка задачі керування якістю прокату

Товстолистовому стану (ТЛС) як об'єкта автоматизації властива певна номенклатура управління, координат стану та вихідних показників, зв'язки між якими носять суттєво нелінійний характер. При цьому деякі зв'язки встановлюються шляхом обробки статистичних даних, тобто. носять імовірнісний характер. До найважливіших показників, що характеризують ефективність функціонування товстолистого стану, відносяться показники якості прокату, які містять [1]:

- а) механічні властивості (границя міцності, границя текучості, відносне видовження, ударна в'язкість при різних температурних умовах та ін.);
- б) точність геометричних розмірів (товщина по листу, поздовжня та поперечна різновтовщинності, ширина, довжина);
- в) форма листа в плані та просторі (відхилення від площинності);
- г) стан поверхні прокату.

Мета автоматизованого управління прокаткою полягає у досягненні оптимізації співвідношення описаних показників для отримання максимального прибутку. У цих умовах може бути постановка задачі оптимізації за векторним критерієм. Однак при згортанні векторного критерію в скалярний, необхідного для вирішення задачі, виникає проблема визначення вагових коефіцієнтів різних показників, яка в загальному випадку зазвичай вирішується на рівні експертних оцінок. У результаті такого конструювання критерію ефективність оптимізації автоматичного управління за цим критерієм суттєво визначається досвідом експертів [1].

Більш строго підійти до постановки задачі атоматизації, рішення якої забезпечувало б максимальну ефективність автоматизації, дозволяє декомпозиція об'єкта із загальної задачі автоматизації до ряду однокритеріальних. Для цього необхідно визначити та формалізувати зв'язки між управліннями та показниками об'єкта.

Формалізація цих зв'язків, їх кількісна оцінка та декомпозиція багатокритеріальної задачі керування якістю товстолистого прокату до ряду автономних однокритеріальних задач описані в [2, 3]. Ці задачі формуються так:

Визначити та здійснити управління  $U$ , що забезпечує відхилення показника  $P$  від заданого значення  $P^*$  у межах допуску  $\delta P$ :

$$U: \rightarrow |P - P^*| \leq \delta P$$

або

$$U: \rightarrow \min |P - P^*|.$$

Вирішення цих задач забезпечує формування необхідних якісних показників прокату.

### 3. Управління механічними властивостями товстолистого прокату

Механічні властивості товстолистого прокату — це один із головних показників його якості. До основних параметрів механічних властивостей прокату відносяться: границя міцності, границя текучості, відносне видовження, ударна в'язкість при різних температурних умовах. Аналіз технології виробництва прокату на товстолистолих станах свідчить про суттєвий вплив хімічного складу і технологічних параметрів на механічні властивості металу. В більшості випадків враховуються такі технологічні параметри: кратність обтисків від сляба до листа, температура нагріву металу перед прокаткою, температурний режим прокатки, температура кінця прокатки, технологічна схема прокатки слябів, режим часткових обтисків, величина обтиску в наступному пропуску, режим охолодження прокату [1, 4]. Математичні моделі прогнозу механічних властивостей прокату наведені в [2, 4].

Як зазначалося вище, механічні властивості прокату визначаються хімічним складом металу та умовами температурно-деформаційного режиму прокатки й охолодження смуги. Одним з ефективних методів прокатки, що включає використання оптимальних параметрів нагрівання та гарячої пластичної деформації заготовки, є контрольована прокатка. Вона являє собою високотемпературну обробку низьколегованих сталей, яка полягає в тому, що нагрівання під обробку тиском і режим обтисків (до досягнення температури кінця прокатки) забезпечують отримання високоміцних марок сталей у гарячекатаному стані з високою ударною в'язкістю при низьких температурах. Зазвичай на заключній стадії прокатки потрібне застосування досить інтенсивних обтисків і забезпечення низької температури кінця прокатки (850–650<sup>0</sup>С). У багатьох випадках якість листа, досягнута при контрольованій прокатці, перевершує можливості термічної обробки, яка виконується після закінчення прокатки [5].

Реалізація режимів контрольованої прокатки супроводжується значними навантаженнями на робочі кліті, так як при зниженні температури металу, що прокочується, різко зростає опір деформації. Отже, отримання заданих механічних властивостей прокату вимагає жорсткого дотримання температурно-деформаційного режиму прокатки та контролю завантаження обладнання, що, зі свого боку, викликає необхідність автоматизованого управління всім технологічним процесом, починаючи з нагрівання слябів у печах.

До ресурсо- і енергозберігаючих технологій обробки металів тиском, що забезпечують підвищення продуктивності праці та якісних показників продукції при виробництві прокату, відноситься технологія термомеханічної обробки металів, яка забезпечує підвищення механічних властивостей без використання дорогих легуючих добавок. Термомеханічна обробка металів (ТМО) — це поєднання операцій пластичної деформації металу та термічної обробки. Така дія на метал дозволяє підвищити його міцність як в результаті наклепу, який виходить при пластичній деформації, так і внаслідок термообробки. Завдяки цьому вдається досягти високого комплексу механічних властивостей сталей та сплавів [6]. Термомеханічна обробка обмежена в часі, оскільки негайно після завершення деформації метал швидко охолоджується (загартування), щоб отримати подрібнену, насичену дислокаціями структуру кристалів металу. Для швидкого охолодження металу після прокатки за ділянкою клітей встановлюють спеціальні установки для прискореного охолодження прокату [7].

У здійснених розробках АСУ ТП передбачається пасивна чи активна форма управління механічними властивостями. Пасивна форма полягає у дотриманні заданих обмежень температурно-деформаційного режиму. При звичайній прокатці — це температура та обтиски в кінці циклу, а при більш складній, контрольованій прокатці — обмеження температурних інтервалів на окремих ділянках обтисків.

Для управління температурним режимом використовується модель температури прокату, яка містить чотири відомих складових: конвекцію, віддачу тепла валкам і охолоджуючій рідині, підігрів прокату за рахунок енергії прокатки. В основу моделі покладені теоретичні залежності, адаптовані до прокатки товстого листа на базі наявного досвіду автоматизації. Управління температурою, як правило, має односторонній вплив — підстуджування прокату на повітрі або охолоджувальною рідиною [2].

Крім пасивної форми, є розробки активного управління механічними властивостями прокату. В основі розглянутого варіанта лежить математична модель прогнозу властивостей листа за його хімічним складом, режимом прокатки та охолодженням. Крім цього, модель дозволяє рекомендувати зміну режиму прокатки або охолодження з метою досягнення заданих механічних властивостей. Рішення про коригування режиму приймає оператор, тобто використовується процедура людино-машинного управління.

Опис систем автоматизованого управління механічними властивостями представлено в [2, 4].

#### 4. Формування геометричних розмірів прокату

Геометричні розміри прокату (листа) формуються в результаті керування режимами прокатки та регулювання зазору валків у пропуску металу через валки.

Регулювання міжвалкового зазору протягом пропуску (натискними механізмами, противигином валків) забезпечує стабілізацію розмірів прокату за його довжиною та певну корекцію абсолютного значення товщини, поперечної різновтовщинності щодо заданого номіналу. Крім того, одним з ефективних каналів управління геометрією прокату за допомогою керування швидкістю головних приводів прокатних станів може бути канал, що використовує ефект швидкісної асиметрії, який полягає у зниженні зусилля прокатки при збільшенні неузгодженості швидкостей валків. Це найбільш доступний, з погляду реалізації, канал автоматизованого управління геометрією смуги, оскільки його використання не вимагає капітальних витрат на реконструкцію обладнання [8].

Існують також способи управління поздовжньою різновтовщинністю на реверсивних листових станах гарячої прокатки шляхом вибору режиму обтисків і швидкостей із метою мінімізації поздовжньої різновтовщинності, викликані зміною температури металу по довжині («температурним клином»). При реверсивній прокатці листів після кожного пропуску утворюється «температурний клин» по довжині прокату, величина якого прямо пропорційна температурі металу в четвертому ступені, часу прокатки в даному пропуску і зворотно пропорційна товщині прокату. Оскільки під час прокатки товщина смуги на виході з кліти завжди менша, ніж на вході — на величину абсолютного обтиску в даному пропуску — то охолодження ділянок смуги, що знаходяться після кліти, відбуватиметься інтенсивніше, ніж ділянок, що знаходяться перед кліттю. Отже, вибором величини часу або, що аналогічно, швидкості прокатки, а також обтисків по пропусках можна впливати на величину «температурного клина» [2, 9].

Основний вплив на формування середньої товщини смуг у партії, поперечної різновтовщинності та ширини, чинить вибір уставок на рівні керування режимами. Формування середньої товщини листа  $h$  ґрунтується на виборі уставок  $H$  розчину валків горизонтальної кліти з урахуванням прогнозу зусилля прокатки  $P$  у черговому пропуску та викликані ним деформації кліти і валкової групи:

$$h = H + P / m(b) + Q / m(Q) + x,$$

де  $m(b)$  — модуль деформації кліти від зусилля прокатки (залежить від ширини прокату  $b$ ),  $m(Q)$  — вплив противигину  $Q$  на розчин валків,  $x$  — поправочний член, що враховує початкове профілювання валків, їх знос і теплову деформацію.

Для прогнозу зусилля прокатки використовуються залежності двох видів [10]:

1. Математичні моделі розрахунку (прогнозу) зусилля  $P$  за апіорними даними, що являють собою відомі теоретичні залежності виду

$$P = f(\sigma_0, \varepsilon, \varepsilon', t, G),$$

де  $\sigma_0$  — базовий опір деформації, що залежить від марки сталі,  $\varepsilon, \varepsilon', t$  — ступінь деформації, швидкість деформації та температура прокату,  $G$  — геометричні параметри осередка деформації.

2. Рекурентні залежності виду

$$P_i = P_{i-1} f(G_i, G_{i-1}),$$

де  $P_i, P_{i-1}$  — прогнозоване зусилля в  $i$ -му пропуску та фактичне в  $(i-1)$ -му,  $G_i, G_{i-1}$  — очікувані параметри осередка деформації у  $i$ -му пропуску та фактичні у  $(i-1)$ -му.

Рекурентні залежності дозволяють прискорити процес обчислень при досить високій точності прогнозу, виключаючи прогнози на перший пропуск циклу або етапу прокатки. Тому для прогнозу зусилля використовуються обидві наведені залежності: описана в п. 1 — для прогнозів до початку прокатки і в перших пропусках після розвороту прокату; описана в п. 2 — для інших пропусків прокатки.

Модель деформації кліті — кусково-лінійна залежність деформації від зусилля прокатки для даної ширини. На чистових клітях у розрахунках зазору валків враховується товщина масляної плівки у підшипниках рідинного тертя опорних валків. Моделі зусилля та деформації адаптуються за результатами вимірювань зусилля прокатки та товщини [2, 11].

Поперечна різнотовщинність листа є результатом спільного впливу таких факторів: початкового профілювання валків, їх зношування, температурної деформації, деформації вигину від зусиль прокатки і противигину. Ці чинники за масштабом часу дії можна розділити на дві групи: статичний профіль валків (перші три фактори) і динамічний (вигин) [12].

У системах автоматизації використовується триточковий товщиномір, в зону дії якого прокат потрапляє кілька разів за цикл з відносно невеликим інтервалом часу. Розглядаючи сусідні вимірювання прокату, можна припустити, що статичний профіль залишився незмінним, а всі зміни абсолютного профілю віднести до деформації валків від зусилля прокатки і противигину. Це дозволяє зробити адаптацію моделі динамічного профілю та розрахунок статичного профілю міжвалкового зазору, тобто моделі зносу та їх температурної деформації за наявності згаданого товщиноміра не застосовуються.

Отже, поперечна різнотовщинність прокату встановлюється на рівні заданої шляхом прогнозу зусилля прокатки, статичного профілю валків та видачі відповідної уставки на противигин. За відсутності противигину розрахунком визначається допустиме з різнотовщинності зусилля прокатки і відповідно коригуються обтиски. Модель деформації вигину валків аналогічна описаній для керування товщиною й адаптується за результатами вимірювання поперечного профілю листа.

Управління середньою шириною прокату складається з витяжки прокату за довжиною — майбутньою шириною (після розвороту прокату) у горизонтальній кліті та обтисків кромки у вертикальній кліті. Довжина — майбутня ширина прокату формується на етапі прокатки впоперек остаточної осі смуги, який передуює етапу прокатки до заданої товщини. На ширину впливають обтиски у вертикальній кліті, природне розширення від прокатки в горизонтальній кліті та вимушене розширення — наслідок приконтального спучування від обтисків у вертикальних валках. Прогноз розширення базується на відповідних математичних моделях. Моделі розширень адаптуються за результатами безпосередніх вимірювань ширини шириноміром у кінці циклу прокатки. За відомими початковими розмірами слябу

або прокату та заданою довжиною — майбутньою шириною — обчислюється кінцева товщина на відповідному етапі процесу [13].

## 5. Управління формою листа в плані та просторі

Управління формою листа (прокату) у плані здійснюється у різний спосіб залежно від складу устаткування стану. Якщо на стані відсутній гідравлічний натискний пристрій у вертикальній та горизонтальній чорнових клітках, то наближення форми прокату в плані до прямокутної забезпечується за рахунок вибору схеми прокатки, співвідношення витяжок при поздовжній і поперечній прокатці в чорновій горизонтальній клітці, розподілу обтисків у вертикальній клітці, а також розподілу обтисків у чорновій горизонтальній клітці на етапі «розбивки ширини».

Наявність у чорновій горизонтальній клітці натискного пристрою, що дозволяє змінювати товщину листа в процесі прокатки (при протяжці та розбивці ширини), дозволяє застосувати принцип MAS-прокатки, який забезпечує шляхом профілювання прокату по товщині компенсацію спотворень бічних та торцевих кромки, що виникають при наступній витяжці до заданої товщини [14].

Форма смуги в просторі (площинність) формується на останньому етапі прокатки і визначається різницею відношення поперечної різнотовщинності  $\delta h_n$  до товщини  $h$  в  $j$ -му і  $i$ -му пропусках:

$$F = f(\delta h_{ni} / h_i - \delta h_{nj} / h_j).$$

Управління формою при заданих кінцевих товщині  $h_N$  та поперечній різнотовщинності  $\delta h_{nN}$  зводиться до забезпечення наведеного співвідношення в межах допустимих значень [15].

При достатніх можливостях противигину валків управління площинністю може повністю покладатися на канал противигину і полягати в отриманні необхідних для збереження площинності  $\delta h_{ni}$ ,  $\delta h_{nj}$  при заданих  $h_i, h_j, P_i, P_j$ . За відсутності противигину збереження площинності забезпечується певною стратегією розподілу обтисків (витяжок) в останніх пропусках. Крім того, може бути використаний канал швидкісної асиметрії як засіб управління площинністю прокату в сукупності із застосуванням оптимальних стратегій розподілу обтисків [16].

## 6. Забезпечення чистоти поверхні прокату

Характеристика стану поверхні сталевих листа містить дефекти від закатування первинної (пічної) і вторинної окалини. Мінімізація цих дефектів забезпечується автоматикою шляхом своєчасного включення системи гідрозбивання, вибору обтисків у горизонтальній та вертикальній клітках, достатніх для ефективного розпушування окалини. Найбільш ефективним і економічним способом видалення первинної окалини є гідравлічний, реалізований струменем води, що б'є з сопла під високим тиском. Цей ефект реалізується системами гідрозбивання.

До недавнього часу на багатьох станах гарячої прокатки металу в системах гідрозбивання окалини струмінь води подавався під порівняно низьким тиском 15–20 МПа, що не забезпечувало створення досить швидкісного напору струменів води, здатного ефективно очищати прокат від окалини, внаслідок чого знижувалась якість готової продукції. Крім того, водоструминні сопла цих систем мають великі діаметри вихідних отворів (5–6 мм) при більшому їх числі, чим зумовлена велика витрата води і, отже, підвищене споживання електроенергії. У сучасних системах гідрозбивання струмінь води подається під тиском порядку 60 МПа. Такі системи забезпечують високу якість поверхні, підвищення сортності

металу за рахунок якісного збиття окалини та суттєву економію енергоресурсів (електроенергії, води, палива в нагрівальних печах) [17, 18].

## 7. Висновки

Розглянуто постановку та декомпозицію задачі комплексного автоматизованого керування якістю прокату на товстолистовому стані, описано отримані в результаті декомпозиції автономні задачі управління, що забезпечують отримання заданих показників якості прокату.

Комплексне автоматизоване керування якістю прокату з розв'язанням розглянутих вище задач забезпечується функціонуванням на ТЛС АСУ ТП, що мають багаторівневу ієрархічну децентралізовану структуру [2].

АСУ ТП ТЛС містять три інтелектуальні рівні:

А. Програмно-логічне та ситуаційне управління механізмами стану, включаючи рольганги, прокатні валки, натискні механізми, лінійки маніпуляторів, противигин, пристрій гідрозбивання та ін.

Б. Автоматичне регулювання параметрів прокату: поздовжньої та поперечної товщини, ширини, температури вздовж довжини смуги.

В. Управління режимами прокатки з видачею уставок на перший та другий інтелектуальний рівні для досягнення найкращих значень описаних показників прокату та процесу прокатки.

## СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Ієвлев М.Г. Автоматизоване управління режимами прокатки на товстолистових станах. *Математичні машини і системи*. 2020. № 4. С. 95–112.
2. Ієвлев М.Г., Грабовський Г.Г. Математичні моделі і алгоритми керування в АСК ТП товстолистових прокатних станів. К.: Техніка, 2001. 248 с.
3. Ієвлев М.Г. Один із способів декомпозиції задачі оптимізації режимів прокатки на товстолистовому стані. *Математичні машини і системи*. 2022. № 3. С. 108–120.
4. Грабовський Г.Г., Ієвлев М.Г. Управління механічними властивостями товстолистого прокату. *Математичні машини і системи*. 2021. № 3. С. 106–112.
5. Грабовський Г.Г., Ієвлев Н.Г. Автоматизована система управління контролюючою прокатки на толстолистовому стані. *Вісник технологічного університету Поділля*. 2004. № 2, Ч. 1, Т. 3. С. 13–15.
6. Грабовський Г.Г., Ієвлев Н.Г. Автоматизоване управління термомеханічної обробкою прокатуваних листів на толстолистовому стані. *Інтелектуальні системи прийняття рішень та інформаційні технології: тези доповідей учасників міжнародної науково-технічної конференції (м. Чернівці, 19–21 травня 2004 р.)*. Чернівці, 2004. С. 232.
7. Ієвлев Н.Г. Автоматичне управління ускореним охолодженням проката на толстолистових станах. *Металл и литье Украины*. 2017. № 4–5. С. 25–29.
8. Грабовський Г.Г., Ієвлев Н.Г. Управління продольною різнотолищиною листів на толстолистових станах з допомогою ефекта скоростної асиметрії. *Математичні машини і системи*. 2019. № 2. С. 111–120.
9. Ієвлев Н.Г. Управління продольною різнотолищиною листів на толстолистових станах. *Металл и литье Украины*. 2018. № 1–2. С. 7–10.
10. Ієвлев Н.Г. Математичні моделі в автоматизованих системах управління режимами об'їзду на толстолистових станах. *Математичні машини і системи*. 2017. № 4. С. 112–119.
11. Ієвлев М.Г., Грабовський Г.Г. Математичні моделі деформації кліти для АСУ ТП товстолистових прокатних станів. *Математичні машини і системи*. 2020. № 3. С. 87–92.
12. Грабовський Г.Г., Ієвлев М.Г., Мойсеєнко С.Є. Управління геометричними параметрами листів на прокатних станах. *Математичні машини і системи*. 2022. № 4. С. 75–84.
13. Ієвлев М.Г., Грабовський Г.Г. Автоматичне управління шириною листа на станах гарячої прокатки. *Математичні машини і системи*. 2023. № 2. С. 82–87.

14. Иевлев Н.Г. Автоматическое управление формообразованием листа в плане на реверсивном стане горячей прокатки. *Математичні машини і системи*. 2019. № 3. С. 111–119.
15. Ієвлєв М.Г., Грабовський Г.Г. Теоретичні та експериментальні дослідження математичних моделей площинності товстолистого прокату. *Науково-технічна інформація*. 2016. № 1 (67). С. 54–62.
16. Иевлев Н.Г. Математические модели плоскостности толстолистого проката применительно к АСУ ТП. *Математичні машини і системи*. 2018. № 1. С. 67–77.
17. Грабовський Г.Г., Корбут В.Б., Ієвлєв М.Г. Пристрій для водоструминної обробки поверхонь матеріалів. Патент України на винахід № 83064. Опубл. 10.06.2008. Бюл. № 11.
18. Грабовський Г.Г., Ієвлєв М.Г. Автоматизована енерго- та ресурсозберігаюча система гідрозбивання окалини для стану гарячої прокатки. *Математичні машини і системи*. 2020. № 1. С. 110–127.

*Стаття надійшла до редакції 30.04.2025*