

О.П. Єгоров, В.Б. Зворикін, О.І. Михальов, М.Ю. Кузьменко
**АВТОМАТИЧНЕ УПРАВЛІННЯ РЕЖИМОМ ПРОКАТКИ
З НАТЯГОМ НА ОСНОВІ ЗМІНИ СТРУМУ ЯКОРЯ
ДВИГУНІВ ПРИВОДУ ВАЛКІВ**

Анотація. Запропоновано схему управління швидкісним режимом прокатки з програмним управлінням натягу прокату в чорновій групі клітей.

Отримано оригінальне вираження, для обчислення натягу прокату, засноване на законах пружною деформації смуги. Частина параметрів цього виразу визначається за таблицями калібрування, частина - прямим виміром. Виконання системи автоматичного управління на основі запропонованої методики дозволяє здійснювати прокатку з контрольованим натягом.

За останнє сторіччя виробництво сортової продукції здійснювалося на лінійних, напівбезперервних і безперервних станах.

Вдосконалення станів спочатку відбувалося за рахунок створення нового обладнання, розробки нових технологічних процесів. Починаючи з 80-тих років ХХ століття, з появою нових мікропроцесорних керуючих комплексів, докорінним чином змінився підхід до автоматизації процесу виробництва дрібносортового прокату на всіх його переділах. Хоча перші мікропроцесорні керуючі контролери і не мали високої швидкодії, великого обсягу пам'яті та можливості програмної реалізації алгоритмів управління, вони дозволили комплексно вирішувати проблеми управління та інформаційного супроводу процесу виробництва прокатної продукції.

Швидкості прокатки на безперервних дрібносортових станах досягли 20 м/с, а на дротяних станах з прокатними блоками - 100 м/с. Це зробило неможливим ручне управління більшістю технологічних операцій, наприклад, таких як розкрій прокату, укладання на холодильник, намотування в бунт і багато інших.

Сучасні системи управління технологічним процесом прокатки об'єднані в єдину розподілену систему управління з обміном інформацією між окремими підсистемами по локальних комп'ютерних мережах.

З точки зору управління ці системи являють собою складну багатозв'язну структуру електромеханічних агрегатів з роздільними контурами управління. Причому, для стійкої роботи всього комплексу, необхідно забезпечити інваріантність роботи окремих контурів управління цими агрегатами.

При створенні і впровадженні систем управління швидкісним режимом прокатки (рис.1) вирішувалися, в основному, наступні завдання.

- Обґрунтування методів управління багатозв'язними електромеханічними комплексами прокатних клітей, що забезпечують інваріантність роботи окремих контурів управління та оцінки роботи всієї системи в цілому.

- Розрахунок режимів настроювання швидкісного режиму прокатки з мінімальним, контрольованим натягом прокату в чорновій групі клітей і з петлею або прогином прокату в чистовій кліті.

- Розробка датчиків контролю технологічних параметрів; натягу, петлі або прогину прокату.

- Розробка систем узгодженої групової зміни частот обертання приводів валків прокатних клітей.

- Створення системи управління геометричними параметрами перерізу кінцевих ділянок прокату за рахунок зміни швидкісного режиму прокатки в останньому проміжку чорнової групи клітей.

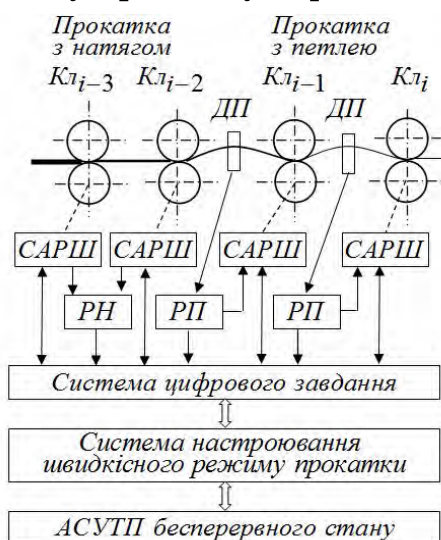


Рисунок 1 - Система управління швидкісним режимом прокатки

САРШ - система автоматичного регулювання швидкості; РН - регулятор натягу; РП - регулятор петлі; ДП - датчик положення

Розглянемо методи управління багатозв'язними електромеханічними комплексами прокатних клітей.

Для безперервної прокатки ідеальним був би режим, коли швидкість прокату на виході з попередньої кліті дорівнювала б швидкості прокату на вході в наступну кліть (рис. 2).

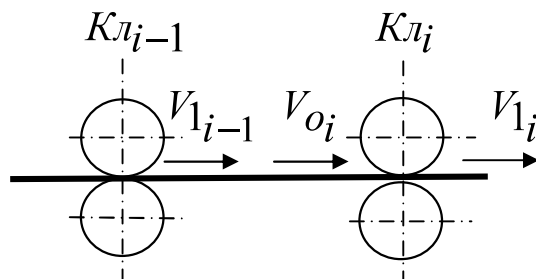


Рисунок 2 - Швидкісний режим прокатки в безперервній групі клітей

Якщо швидкість прокату $V_{1_{i-1}}$ буде більше швидкості V_{o_i} , то режим прокатки називається: прокатка з підпиранням. Якщо навпаки - то з натягом. У чистовій групі прокатних клітей можливий режим прокатки з петлею, коли в міжклітьовому проміжку створюється і підтримується запас прокату, що перевищує відстань між валками клітей.

На швидкість прокату на вході і виході з валків клітей впливають множинні чинники: величина обтиснення, температура прокату, коефіцієнт тертя в осередку деформації, межа плинності та інші.

У теорії прокатки отримані залежності, що зв'язують ці параметри. Наведемо деякі з них.

При прокатці вважають, що обсяг металу до обтиску дорівнює обсягу металу після обтиску [1]:

$$S_{o_i} V_{o_i} = S_{1_i} V_{1_i}, \quad (1)$$

де S_{o_i} , S_{1_i} відповідно, площа поперечного перерізу прокату до обтиску, та після обтиску в кліті i , V_{o_i} , V_{1_i} - відповідно швидкість прокату на вході і виході з осередку деформації.

Формула (1) дозволяє визначити співвідношення швидкостей переднього та заднього торців прокату при сталому процесі.

$$V_{1_i} = V_{o_i} \frac{S_{o_i}}{S_{1_i}} = \lambda_i V_{o_i}, \quad (2)$$

де λ_i - коефіцієнт витягу в кліті i .

Таким чином, швидкість переміщення прокату в осередку деформації не постійна. Розрізняють зону відставання, зону випередження і нейтральний перетин (рис 3).

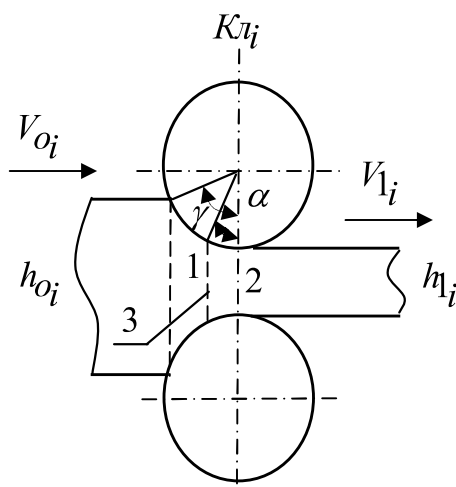


Рисунок 3 - Зони випередження і відставання в осередку деформації
1- зона відставання, 2 – зона випередження, 3- нейтральний перетин

Розглянемо умови виникнення натягу прокату в міжклітьовому проміжку, утвореному клітьми $K_{l_{i-1}}$, K_{l_i} (рис. 2). Відповідно до закону Гука для пружної деформації зразка до нього необхідно прикласти силу F , яка визначається за формулою

$$F = E_{\Delta} l S, \quad (3)$$

де E модуль пружності Юнга, $_{\Delta} l$ - пружне розтягнення зразка, S - площа поперечного перерізу.

У міжклітьовий проміжок кліть вносить прокат довжиною $l_{l_{i-1}}$, виражену через швидкість прокатки

$$l_{l_{i-1}} = \int_0^t V_{l_{i-1}} dt, \quad (4)$$

У той же самий час кліть виносить з проміжку прокат довжиною, вираженої також через швидкість, яка дорівнює:

$$l_{o_i} = \int_0^t V_{o_i} dt, \quad (5)$$

Якщо довжина l_{o_i} буде більше ніж $l_{l_{i-1}}$, то виникає режим натягу прокату. Сила, що розтягує $F_{l_{i-1},i}$ визначається законом Гука. Зміна сили $F_{l_{i-1},i}$ в часі визначається залежністю (формула Морозова):

$$\frac{dF_{i-1,i}}{dt} = \frac{ES_{o_i}}{L_{i-1,i}} (V_{o_i} - V_{1_{i-1}}), \quad (6)$$

де $L_{i-1,i}$ довжина міжклітьового проміжку.

При прокатці натяг в міжклітьовому проміжку не змінюється до нескінченності, а має кінцеву межу, яка визначається новим сталим станом, коли виконується рівняння:

$$V_{1_{i-1}} - V_{o_i} = 0, \quad (7)$$

$$\omega_{i-1} R_{k_{i-1}} (1 + s_{i-1}) - \frac{\omega_i R_{k_i} (1 + s_i)}{\lambda_i} = 0, \quad (8)$$

де ω_{i-1} , ω_i - відповідно, кутова частота валків попередньої Kl_{i-1} та подальшої Kl_i клітей; $R_{k_{i-1}}$, R_{k_i} - відповідно, радіус клітей Kl_{i-1} і Kl_i ; s_{i-1} , s_i - коефіцієнти випередження.

Численні дослідження [1] свідчать, що в більшості випадків прокатки випередження знаходиться в межах 1-10%, тобто його числове значення невелике. Що ж стосується відставання, то воно може бути значно більше, наприклад, 30% та й більше. Тому будемо враховувати зміну швидкості прокату під дією натягу тільки на вході в кліть, наступну за проміжком.

Як впливає з формули (8) швидкість прокату на вході в кліть буде змінюватися за рахунок зміни коефіцієнта витягу, а це в свою чергу відбувається під дією натягу в цій кліті.

Для визначення розширення скористаємося формулою Бахтінова Б.П. [1] і врахуємо зміну розширення за рахунок натягу прокату:

$$\Delta b_{h_i} = \left(1.15 \frac{\Delta h_i}{2h_{o_i}} \right) \left[\sqrt{R_{k_i} \Delta h_i} - \frac{\Delta h_i}{2f_{t_i}} \right] C_{q_{i-1,i}} = \Delta b_{h_i} C_{q_{i-1,i}}, \quad (9)$$

де Δb_{h_i} - розширення прокату за рахунок його обтиску; $C_{q_{i-1,i}}$ - коефіцієнт; Δh_i - обтиснення в i -тій кліті; f_{t_i} - коефіцієнт тертя в осередку деформації i -ої кліті.

Впливом переднього натягу на розширення можна знехтувати. Тоді величина коефіцієнта C_q наближено визначається за формулою [1]:

$$C_{q_{i-1,i}} = 1 - 2 \frac{q_{o_i}}{\sigma_i}, \quad (10)$$

де q_{o_i} - питомий задній натяг прокату; σ_i - напруга плинності для заданих умов деформації.

Тоді можна записати:

$$\Delta b_{l_i} = \Delta b_{h_i} \left(1 - 2 \frac{q_{o_i}}{\sigma_i} \right) = \Delta b_{h_i} - 2 \Delta b_{h_i} \frac{q_{o_i}}{\sigma_i} = \Delta b_{h_i} - \Delta b_{q_i}, \quad (11)$$

де $\Delta b_{q_i} = 2 \Delta b_{h_i} \frac{q_{o_i}}{\sigma_i}$ - розширення прокату за рахунок натягу.

Визначимо зміну швидкості прокату на вході в кліть K_{l_i} від натягу як

$$\Delta V_{o_i} = K_{F_i} F_{i-1,i}. \quad (12)$$

Перепишемо рівняння (6) в наступному вигляді:

$$\frac{dF_{i-1,i}}{dt} = \frac{ES_{o_i}}{L_{i-1,i}} (V_{o_i} - K_{F_i} F_{i-1,i} - V_{1_{i-1}}), \quad (13)$$

або

$$\frac{dF_{i-1,i}}{dt} + \frac{ES_{o_i}}{L_{i-1,i}} K_{F_i} F_{i-1,i} = \frac{ES_{o_i}}{L_{i-1,i}} (V_{o_i} - V_{1_{i-1}}). \quad (14)$$

Подальші перетворення дають:

$$\frac{L_{i-1,i}}{ES_{o_i} K_{F_i}} \times \frac{dF_{i-1,i}}{dt} + F_{i-1,i} = \frac{1}{K_{F_i}} (V_{o_i} - V_{1_{i-1}}). \quad (15)$$

Позначимо $\frac{L_{i-1,i}}{ES_{o_i} K_{F_i}}$ через τ_{q_i} і отримаємо рішення цього диференціального рівняння:

$$F_{i-1,i} = \frac{1}{K_{F_i}} (V_{o_i} - V_{1_{i-1}}) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{q_i}}} \right). \quad (16)$$

Так як постійна τ_{q_i} має значення мільйонній частки секунди то перехідним процесом - зміною натягу прокату при неузгодженості його в міжклітьовому проміжку можна знехтувати і при математичному описі цього процесу вважати його безінерційним.

Визначимо залежність між неузгодженістю швидкостей прокату в міжклітьовому проміжку з натягуванням його в сталому режимі.

У сталому режимі прокатки швидкість металу на виході з кліті $V_{1_{i-1}}$ рівняється швидкості металу на вході в наступну кліть V_{o_i} .

Площа прокату на виході з кліті $S_{1_{i-1}}$ також дорівнює площі прокату

на вході в наступну кліть S_{o_i} . В цьому випадку коефіцієнт витяжки через швидкість прокату можна визначити наступним чином:

$$\lambda_i = \frac{S_{1_{i-1}}}{S_{1_i}} = \frac{V_{1_i}}{V_{o_i}} = \frac{V_{1_i}}{V_{1_{i-1}}}, \quad (17)$$

або

$$S_{1_i} = S_{1_{i-1}} \frac{V_{1_{i-1}}}{V_{1_i}}. \quad (18)$$

У свою чергу площа поперечного перерізу прокату на виході i - ої кліті визначиться:

$$S_{1_i} = (b_{o_i} + {}_{\Delta}b_{h_i} - {}_{\Delta}b_{q_i}) h_{1_i}, \quad (19)$$

де ${}_{\Delta}b_{q_i}$ - розширення прокату за рахунок натягу.

Підставивши (19) в (18) отримаємо:

$$\begin{aligned} (b_{o_i} + {}_{\Delta}b_{h_i} - {}_{\Delta}b_{q_i}) h_{1_i} &= S_{1_{i-1}} \frac{V_{1_{i-1}}}{V_{1_i}}, \\ {}_{\Delta}b_{q_i} &= -S_{1_{i-1}} \frac{V_{1_{i-1}}}{V_{1_i} h_{1_i}} + (b_{o_i} + {}_{\Delta}b_{h_i}). \end{aligned} \quad (20)$$

Враховуючи вираз (11) запишемо:

$$\frac{2 {}_{\Delta}b_{h_i} q_{o_i}}{\sigma_i} = -S_{1_{i-1}} \frac{V_{1_{i-1}}}{V_{1_i} h_{1_i}} + (b_{o_i} + {}_{\Delta}b_{h_i}), \quad (21)$$

З рівняння (21) отримаємо питомий натяг прокату в міжклітьовом проміжку:

$$q_{o_i} = \frac{\left[(b_{o_i} + {}_{\Delta}b_{h_i}) - S_{1_{i-1}} \frac{V_{1_{i-1}}}{V_{1_i} h_{1_i}} \right] \sigma_i}{2 {}_{\Delta}b_{h_i}}. \quad (22)$$

У наведеному виразі (22) всі дані для розрахунку питомого натягу прокату можна отримати з таблиці калібрування.

Наведений вираз (22) є оригінальним, так як в технічній літературі з теорії прокатки не зустрічався раніше.

Під час налаштування швидкісного режиму прокатки про величину натягу судять по перепаду струму якоря двигуна до захоплення прокату подальшою кліттю і після захоплення прокату. Зменшення значення струму говорить про наявність натягу прокату.

Для оцінки величини натягу прокату зі зміни струму якоря отримаємо математичну модель моменту прокатки, згідно [1].

Момент прокатки при задньому натягу визначається з виразу:

$$M_{np_i} = \left(2P_i \Psi_i \frac{l_{d_i}}{\mu_i} \right) + q_{o_i} S_{o_i} R_{k_i}. \quad (23)$$

де P_i - зусилля прокатки; Ψ_i - коефіцієнт положення рівнодіючої тиску на валки; l_{d_i} - довжина осередку деформації μ_i - передавальне число редуктора головного приводу валків;

За даними калібрування для кліті 7 дрібносортового стану 250-1 [3] виконаний розрахунок величини натягу прокату і моменту на валу двигуна з заднім натягом і без нього [3].

Розрахуємо момент прокатки та потужність прокатки без натягу.

Частота обертання двигуна $n_7 = 502$ об/хв; $\omega_i = \omega_7 = 52.54$ с-1.

Момент прокатки $M_{np_i} = 2P_i \Psi_i \frac{l_{d_i}}{\mu_i} = 1830$ Нм.

Потужність прокатки $N_i = M_{np_i} \omega_i \mu_i = 329$ кВт.

Таким параметрам прокатки відповідає двигун типу 4П-450-16-630 УЗ: потужність - 800 кВт, напруга живлення - 600 В, число обертів вала - 800 об/хв, момент інерції - 41 кгм².

Встановимо швидкості прокату на виході 7-ої і 6-ої клітей у відповідності з таблицею калібрування [3], шляхом завдання відповідних частот обертання двигунів клітей $\omega_{17} = 52.57$ 1/с, $\omega_{16} = 50.68$ 1/с.

Цим частотам обертання відповідають наступні значення швидкостей прокату: $V_{17,1} = 2.16$ м/с, $V_{16,1} = 1.61$ м/с.

Розрахуємо момент прокатки і струм у ланцюзі двигуна при прокатці з натягом для наведених вище величин.

Момент прокатки, обумовлений натягом:

$$q_{o_i} S_{o_i} R_{k_i} = 1370 \text{ Нм.}$$

Момент прокатки з заднім натягом:

$$M_{np_i} = \left(2P_i \Psi_i \frac{l_{d_i}}{\mu_i} \right) + q_{o_i} S_{o_i} R_{k_i} = 1830 + 1370 = 3200 \text{ Нм.}$$

Струм якоря при прокатці, обумовлений натягом:

$$I_{q_i} = 43.9 \text{ А.}$$

Струм якоря при прокатці без натягу:

$$I_{n_i} = 391 \text{ А.}$$

Повний струм якоря при прокатці з натягом:

$$I_{nq_i} = I_{n_i} + I_{q_i} = 391 + 43.9 = 434.9 \text{ А.}$$

Так як радіус валків і потужність двигунів головних приводів клітей чорнової групи приблизно однакові, то така ж зміна струму (тільки в меншу сторону) відбудеться в кліті 6 дрібносортового стану 250-1.

Визначимо коефіцієнт співвідношення лінійних швидкостей прокату на виході 7-ої і 6-ої клітей (перше значення $n = 1$):

$$k_{i,n} = \frac{V_{1_{i,n}}}{V_{1_{i-1,n}}} \quad (24)$$

Для $n = 1$ цей коефіцієнт буде дорівнювати:

$$k_{i,1} = \frac{V_{1_{7,1}}}{V_{1_{6,1}}} = \frac{2.16}{1.61} = 1.34.$$

Коефіцієнту співвідношення $k_{i,1} = 1.34$ відповідають $q_{o_i} = 6.92$ Н/мм², $I_{q_i} = 43.9$ А.

Змінюючи частоту обертання двигуна кліті 7, визначимо ряд значень коефіцієнту співвідношення швидкостей прокату. Для кожного отриманого значення $k_{i,n}$ обчислимо питомий натяг прокату і перепад струму в двигуні головного приводу валків кліті 6 за рахунок виникаючого натягу прокату після захоплення його кліттю 7.

Графіки цих залежностей представлені на рис. 4.

Отримані результати дозволяють або візуально оцінювати настрійку швидкісного режиму прокатки в чорновій групі клітей, або виконати систему автоматичного управління цим режимом.

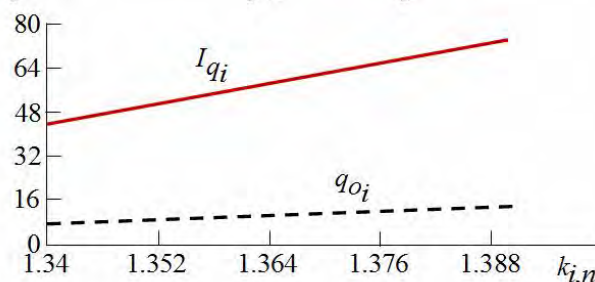


Рисунок 4 - Графіки зміни струму якоря і натягу прокату від співвідношення швидкості прокату на виході і на вході в кліть

Розглянемо систему управління швидкісним режимом прокатки, зображену на рис. 1. Величина допустимого міжклітьового натягу розраховується в системі налаштування швидкісного режиму прокатки. Перераховане значення міжклітьового натягу з урахуванням перепаду струмів в якірних ланцюгах двигунів від натягу (у відповід-

них міжклітьових проміжках) передається у вигляді завдання до регуляторів натягу РН. Регулятори натягу керують якірними струмами двигунів приводів валків суміжних клітей і коригують співвідношення швидкостей приводів валків так, щоб при заповненні стану прокатом перепади струмів від натягу прокату відповідали заданим.

На рис. 5 зображена зміна струмів головних електроприводів сусідніх клітей при автоматичному управлінні швидкісним режимом прокатки в чорновій групі клітей.

Після захоплення металу валками кліті 1 (в момент часу t_1), на інтервалі часу τ_1 запам'ятовується струм вільної прокатки в двигуні кліті 1 ($I_{1.CB}$). У момент часу t_2 відбувається захоплення прокату валками кліті 2. Якщо є натяг прокату між клітями 1 і 2, то струм двигуна кліті 1 зменшиться на величину ΔI_1 . На інтервалі τ_2 запам'ятовується струм двигуна кліті 1 при наявності натягу.

Для зменшення натягу система управління знижує частоту обертання валків кліті 2, так, щоб струм в кліті 1 зріс ($I'_{1.CB}$). При цьому струм в кліті 2 знижується на величину ΔI_2 . Різниця між приростами струмів ΔI_1 і ΔI_2 визначить нове зменшене значення натягу прокату.

Крім цього, відповідно до запропонованого методу програмного управління натягом прокату зі зміни виходу регулятора петлі РП в чистовій групі [5], можна повністю виключити різношірінність профілю, пов'язану з натягом прокату.

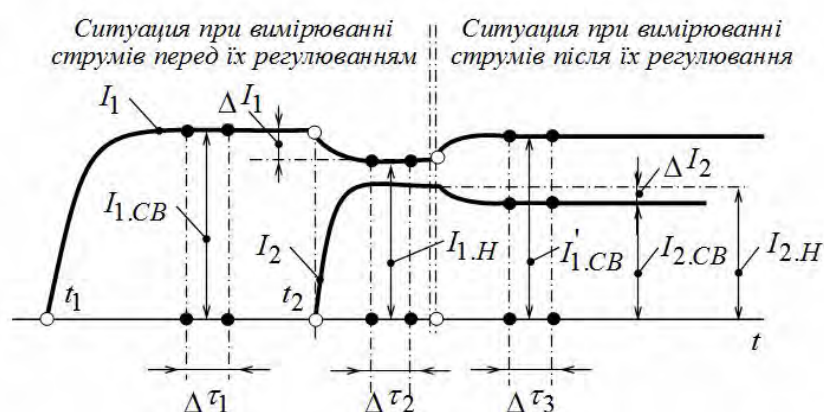


Рисунок 5 - Графіки змін струмів I_1 та I_2 двигунів валків суміжних клітей 1 та 2 при прокатці з натягом: $I_{1.CB}$, $I_{2.CB}$ - струми при вільній прокатці; $I_{1.N}$, $I_{2.N}$ - струми при прокатці з натягом; ΔI_1 , ΔI_2 - збільшення відповідних струмів

Висновки

1. Отримана формула розрахунку натягу прокату дозволяє за даними калібрування обчислити частоти обертання валків суміжних клітей, що забезпечує прокатку передньої ділянки прокату з мінімальним натягом.

2. Запропонована методика розрахунку натягу прокату дозволяє автоматично настроювати швидкісний режим прокатки, використовуючи зміну струму якоря двигунів приводу валків.

3. Виконання систем автоматичного управління на базі запропонованої методики дозволить здійснювати прокатку з контрольованим натягом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грудев А.П. Теория прокатки: Учебник для вузов / А.П. Грудев. - М.: Металлургия, 1988. - 240 с.

2. Теория прокатки. Справочник / А.И. Целиков, А.Д. Томленов, В.И. Зюзин и др. - М.: Металлургия, 1982.- 335 с.

3. Разработка методов и технических решений по увеличению точности размеров сечений и качества арматурного проката на мелкосортном стане 250-1 СПЦ-1 КГГМК «Криворожсталь»: отчет по НИР (заключительный) №Х-03/03/1132 / НИИ Металлургии и материаловедения, рук. Дударенко А.А., исполн.: Смилянко И.Н., Бабенко М.А., Курочкин А.Ф., Белый Н.П., Дударенко А.А., Егоров В.С., Егоров А.П., Потап О.Е., Ночвинов П.В., Дорошенко С.В. - Днепропетровск, 2003. - 117 с.- № ГР №0103V003750.- Инв. № 4.23-2003.

4. Моделирование системы управления толщиной полосы непрерывного широкополосного стана горячей прокатки для студентов ИПК МК специальностей 7.092501, 7.092203, 7.090404 / Сост.: Егоров А.П., Егоров В.С., Зворыкин В.Б., Хинин М.И. - Днепропетровск: ИПК МК, 2000. - 76 с.

5. Егоров А.П., Зворыкин В.Б., Михалев А.И., Кузьменко М.Ю., Балакин В.Ф. Многосвязная система управления скоростным режимом прокатки на непрерывном мелкосортном стане. Системні технології. Регіональний межвузівський збірник наукових праць - Випуск 5 (106) -. Дніпропетровськ, 2015, с. 36-44.