

**І. Ю. Приходько**, д.т.н, с.н.с., зав.відділом, ORCID 0000-0001-5651-8106

**С. О. Воробей**, д.т.н, с.н.с., ORCID 0000-0003-0119-3935

**В. В. Разносілін**, м.н.с., ORCID 0000-0002-4463-4588

**В. В. Корінний**, н.с., ORCID 0000-0002-8329-781X

*Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України*

## **КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ОБЛАДНАННЯ ШИРОКОШТАБОВОГО СТАНА**

**Анотація.** Мета роботи – розробка комп'ютерної системи розрахунку та оптимізації режимів гарячої прокатки штаб, прогнозування та підвищення залишкового ресурсу обладнання прокатних станів. Показано, що в останні роки спостерігається постійне збільшення обсягів виробництва гарячекатаних штаб з високоміцних сталей та особливо тонких штаб. Освоєння виробництва таких штаб призводить до збільшення навантажень на обладнання прокатних станів. Наслідком є збільшення зносу елементів обладнання та передчасні їх поламки. В Інституті чорної металургії НАН України розроблена комп'ютерна система онлайн моніторингу залишкового ресурсу широкоштабового стану гарячої прокатки. Основними функціями комп'ютерної системи є: адаптація моделей енергосилових параметрів процесу прокатки; верифікація моделей за фактичним сортаментом; розрахунки енергосилових параметрів за адаптованими моделям; оптимізація режимів прокатки для забезпечення допустимих значень енергосилових параметрів прокатки та цільової температури завершення прокатки, максимальної продуктивності стану; розрахунки числа циклів навантажень елементів в обладнанні стану; оцінка залишкового ресурсу обладнання з урахуванням його вихідних значень. Для проектування системи прогнозування залишкового ресурсу було обрано такі методи схематизації: для динамічних навантажень - метод виділення повних циклів, для статичних навантажень - метод екстремумів. Всі об'єкти лінії приводу, які діагностуються, розділені на три класи: деталі, які можуть бути як окремо, так і в складі вузлів або агрегатів; вузли, які можуть бути як окремо, так і в складі агрегатів; агрегати, які складаються з деталей і вузлів. Розрахунок залишкового ресурсу виконується тільки для деталей. Залишковий ресурс вузла або агрегату визначається за деталлю, що входить до нього і має найменший залишковий ресурс. Розроблена комп'ютерна система була випробувана на одному з діючих широкоштабових станів гарячої прокатки. Для цього було налагоджено передачу вихідних даних, які містяться в промислових базах в розроблену комп'ютерну систему моніторингу залишкового ресурсу. Випробування показало достатньо високу надійність прогнозування енергосилових параметрів прокатки штаб і оцінки залишкового ресурсу обладнання і лінії приводу валків робочих клітей.

**Ключові слова:** широкоштабовий стан гарячої прокатки, параметри технології, ресурс обладнання.

*«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. – 2021. – Випуск 35  
«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2021. – Vypusk 35  
«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2021. – Collection 35*

**Посилання для цитування:** Приходько І. Ю., Воробей С. О. Разносілін В. В., Корінний В. В. Комп'ютерна система моніторингу залишкового ресурсу обладнання широкоштабового стана. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2021. Вип. 35. С. 149-158. (In Ukrainian). DOI 10.52150/2522-9117-2021-35-149-158

**Вступ.** В останні роки спостерігається постійне збільшення обсягів виробництва гарячекатаних штаб з високоміцних сталей, особливо тонких штаб (товщиною 0,8-1,5 мм) та штаб з підвищеним відношенням ширини до товщини [1, 2]. Однак освоєння виробництва таких гарячекатаних штаб призводить до збільшення навантажень на обладнання прокатних станів. Наслідком чого є збільшення зносу елементів обладнання та передчасні їх поламки. У зв'язку з цим актуальними задачами становляться надійне прогнозування енергосилових параметрів прокатки та оцінка залишкового ресурсу обладнання, що дозволить оптимізувати режими прокатки штаб та своєчасно попереджувати вихід обладнання з експлуатації.

**Мета роботи** – розробка комп'ютерної системи розрахунку та оптимізації режимів гарячої прокатки штаб, прогнозування та підвищення залишкового ресурсу обладнання прокатних станів.

**Результати роботи.** Створена в Інституті чорної металургії комп'ютерна система базується на розроблених раніше методах моделювання параметрів гарячої прокатки штаб та прогнозування навантажень на обладнання прокатного стана [3-5].

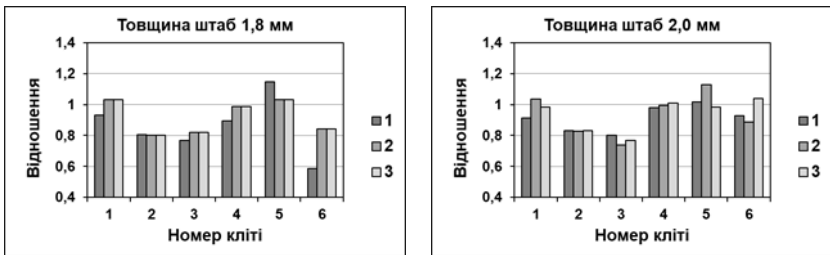
Основними функціями комп'ютерної системи є:

- адаптація моделей енергосилових параметрів процесу прокатки;
- верифікація моделей за фактичним сортаментом;
- розрахунки енергосилових параметрів за адаптованими моделям;
- оптимізація режимів прокатки за основними критеріями;
- розрахунки числа циклів навантажень елементів в обладнанні стана;
- оцінка залишкового ресурсу обладнання з урахуванням його вихідних значень.

Система призначена для розрахунку раціональних режимів прокатки, оцінки здатності витримувати навантаження і прогнозування довговічності основного обладнання широкоштабового стана гарячої прокатки (ШСГП) при прокатці різних партій існуючого і запланованого до освоєння сортаменту, в тому числі особливо тонких штаб. Комп'ютерна програма включає файли вихідних даних за марками сталі, параметрам моделей і обладнання ШСГП, файли результатів адаптації та верифікації моделей, файли результатів розрахунку ресурсу обладнання.

Проведений аналіз показав, що розроблена модель навіть без адаптації

адекватно описує температурно-швидкісні параметри прокатки особливо тонких штаб на ШСГП з різним складом обладнання. Похибка розрахунків температури прокату не перевищує  $\pm 10-15$  °С. У той же час моделі розрахунку енергосилових параметрів прокатки потребують процедури адаптації до умов кожного ШСГП. На рис. 1 наведено середні відношення розрахованих значень моменту прокатки до експериментальних для клітей чистової групи при прокатці штаб товщиною 1,8 і 2,0 мм. Середнє відношення розрахованих значень моменту прокатки до експериментальних для всіх клітей чистової групи становить: для штаб товщиною 1,5 мм – 0,86; 1,8 мм – 0,89; 1,9 мм – 0,91; 2,0 мм – 0,93.



1 - 1,8×1000 мм, сталь 1пс;  
 2 - 1,8×1000 мм, сталь 2пс;  
 3 - 1,8×1000 мм, сталь 3С-8

1 - 2,0×1250 мм, сталь 08кп;  
 2 - 2,0×1250 мм, сталь 2пс;  
 3 - 2,0×1250 мм, сталь 3пс

Рисунок 1 – Середні відношення розрахованих значень моменту прокатки до експериментальних для клітей чистової групи при прокатці штаб товщиною 1,8 і 2,0 мм.

Наведені дані показують, що похибка розрахунків моменту прокатки в більшості випадків становить від  $-20$  до  $+12$  %, тобто математичні моделі забезпечують достатньо високу точність. Однак слід відзначити, що для клітей № 6, 7 і 10 розраховані значення моменту прокатки менші від експериментальних у всіх випадках на 18-35 %, а в клітях № 1 і 9 – більші на 5-15 %. Нами було проаналізовано деякі можливі причини системних похибок. В клітях № 8-10 застосовується противигін робочих валків для регулювання профілю поперечного перерізу і площинності штаб, який призводить до збільшення навантажень на валки та лінію привода в кліті № 8 – на 3-4 %; № 9 – 4-7 %; № 10 – 7-10 %. В наявній базі даних ШСГП фіксується номінальна товщина штаб. Фактична товщина штаб, наприклад, при номінальній 1,5 мм, складає 1,35-1,65 мм. При розрахунках параметрів прокатки по номінальній товщині похибка може складати  $\pm 10-15$  %.

При розрахунках енергосилових параметрів прокатки важливо враховувати коефіцієнт корисної дії (к.к.д.) лінії привода кліті і двигуна. В базовій математичній моделі цей показник прийнято незмінним (0,85). В той же час відомо, що на к.к.д. двигуна суттєво впливають ступінь завантаженості і швидкість обертів (див., наприклад, [6, 7]). Врахування цих факторів дозволяє знизити похибку в розрахунках енергосилових параметрів прокатки майже в два рази.

Аналіз теоретичних методів розрахунку енергосилових параметрів прокатки показує, що найбільш значимим і водночас найбільш необґрунтованим є вплив коефіцієнту напруженого стану, який залежить від відношення довжини осередку деформації до середньої товщини штаб (фактор форми осередку деформації) та коефіцієнту тертя в осередку деформації [3]. Тому саме коефіцієнт напруженого стану доцільно використати при адаптації математичних моделей для конкретного листопрокатного стану. На рис. 2 показана залежність коефіцієнту адаптації ( $K_{Ad}$ ) від фактору форми осередку деформації для штаб товщиною 1,5 і 2,0 мм.

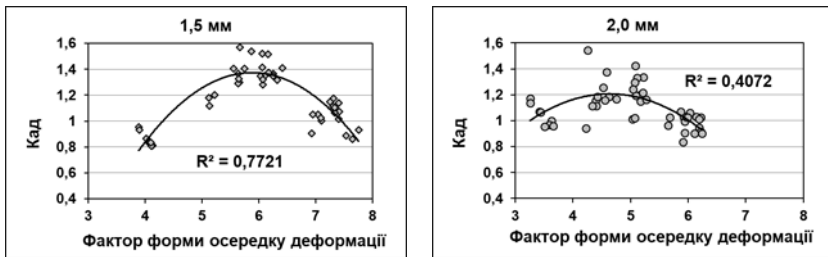


Рисунок 2 – Залежність коефіцієнту адаптації від фактору форми осередку деформації для штаб товщиною 1,5 і 2,0 мм.

Наступна задача дослідження полягала в визначенні раціонального методу діагностування залишкового ресурсу обладнання прокатного стану. Проведений нами аналіз показав, що найбільш оптимальним з точки зору поєднання оперативності і точності діагностики представляється метод діагностування залишкового ресурсу по циклам навантаження. Для проектування системи прогнозування залишкового ресурсу було обрано такі методи схематизації:

- для динамічних навантажень - метод виділення повних циклів, тому що в даному методі враховуються як основні так і накладені цикли.
- для статичних навантажень - метод екстремумів, тому що він добре

підходить до процесів з симетричним розподілом екстремумів щодо середнього навантаження і простий в реалізації, що має важливе значення при обробці досить тривалих часових рядів.

Всі об'єкти лінії приводу, які діагностуються, розділені на три класи: деталі, які можуть бути як окремо, так і в складі вузлів або агрегатів; вузли, які можуть бути як окремо, так і в складі агрегатів; агрегати, які складаються з деталей і вузлів.

Розрахунок залишкового ресурсу по циклам навантаження виконується тільки для деталей. Залишковий ресурс вузла або агрегату визначається за деталлю, що входить до нього і має найменший залишковий ресурс. Фактично, в якості залишкового ресурсу деталі розглядається відношення площі накопичених циклів навантаження до загальної максимально можливої площі навантажень на гістограмі Велера. Розроблена комп'ютерна система була випробувана на одному з діючих ШСГП. Для цього було налагоджено передачу вихідних даних, які містяться в промислових базах в розроблену комп'ютерну систему моніторингу залишкового ресурсу. Це дозволило на першому етапі досліджень провести аналіз температуро-швидкісних, деформаційних та енергосилових параметрів прокатки.

На рис. 3 наведено деякі співвідношення параметрів прокатки. Зокрема, статистично значимими є наступні залежності:

$$h_P = 20,05 \cdot h_{II}^{0,105}; \quad R^2 = 0,49; \quad (1)$$

$$v_{II} = 13,85 / h_{II}^{0,576}; \quad R^2 = 0,77; \quad (2)$$

$$t_{KII} = 787,4 \cdot h_{II}^{0,0721}; \quad R^2 = 0,57; \quad (3)$$

$$t_{KII} = 508,6 \cdot (h_{II} \cdot v_{II})^{0,167}; \quad R^2 = 0,85; \quad (4)$$

В залежностях (1-4) прийнято наступні умовні позначення:  $b_{II}$  – ширина штаб, мм;  $h_P$  – товщина розкатів, мм;  $h_{II}$  – товщина штаб, мм;  $V_{II}$  – швидкість прокатки штаб, м/с;  $t_{KII}$  – температура кінця прокатки, °C;  $h_{II} \cdot V_{II}$  – константа прокатки.

Ці залежності доцільно використовувати для початкової розробки параметрів прокатки, наприклад, нового сортаменту штаб з подальшою оптимізацією за допомогою розробленої автоматизованої комп'ютерної системи моніторингу залишкового ресурсу.

Проведено аналіз енергосилових параметрів прокатки по клітях ШСГП при прокатці штаб різного сортаменту, включаючи товщину 1,5 мм. Встановлено закономірності зміни середнього для різного сортаменту моменту прокатки в клітях стана. Найбільш навантаженими є перші кліті чорнової та чистової груп. Багато елементів обладнання в лініях приводу клітей працюють або на граничному моменті навантаження, або з перевантаженням по статичному моменту прокатки. Якщо додати

динамічні навантаження хоча б з мінімальним коефіцієнтом 2,0, то практично всі елементи обладнання працюють з перевантаженням в період захвату металу валками. Коефіцієнт варіації навантажень має тенденцію збільшення до останніх клітей стана. Визначено частоти наростання моментів прокатки по клітям стана, які мають досить широкі діапазони, що означає можливість посилення динамічних навантажень в лініях приводу для певних типів сортаменту.

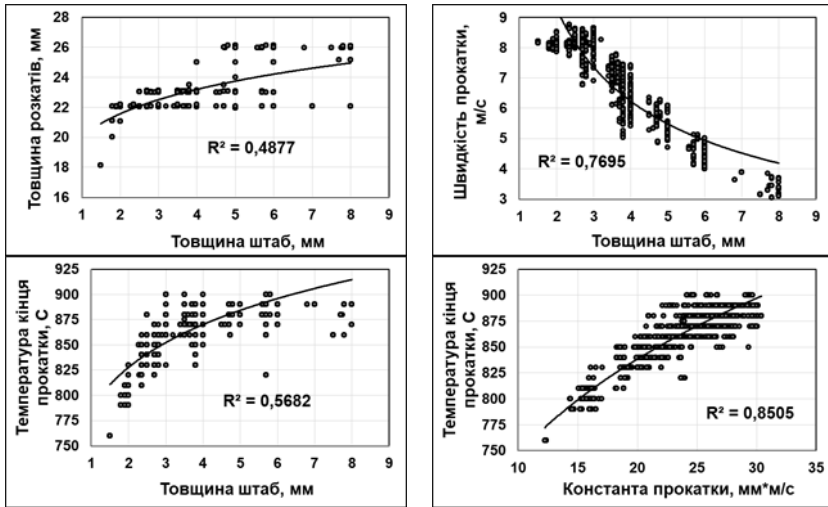


Рисунок 3 – Співвідношення деяких параметрів прокатки на ШСГП.

Проведені дослідження дозволили отримати статистичні залежності сили прокатки ( $P_{ПР}$ ) від моменту на двигунах клітей ( $M_{ДВ}$ ), які наведено в табл. 1. Це важливі залежності, так як заміри сили прокатки на цьому стані не проводяться. Виконано порівняльний аналіз режимів прокатки штаб товщиною 2,0 і 1,5 мм з низьковуглецевої сталі, існуючих, а також оптимізованих (розрахункових). Порівняння навантажень в клітях виконано для ширини 1000 мм, тому що ширші штаби тонкого сортаменту на стані практично не прокатували. Встановлено, що прокатка особливо тонких штаб збільшує статичні навантаження в клітях на 15-20 %.

Оцінку тривалості роботи обладнання проводили на прикладі вкладишів шпинделів клітей № 4-7. Тривалість роботи вкладишів визначається, в значній мірі, їх зносом. Дані по зносу вкладишів наведено на рис. 4.

Таблиця 1 - Залежності сили прокатки від моменту двигуна по клітям ШСПП.

Кліть	Рівняння регресії	$R^2$
ДУО	$P_{\text{ПР}}=135,62 \cdot M_{\text{ДВ}}-5,765$	0,95
1	$P_{\text{ПР}}=131,52 \cdot M_{\text{ДВ}}-1508,2$	0,98
2	$P_{\text{ПР}}=325,41 \cdot M_{\text{ДВ}}-1272,1$	0,92
3	$P_{\text{ПР}}=174,98 \cdot M_{\text{ДВ}}+1209,1$	0,88
4	$P_{\text{ПР}}=124,85 \cdot M_{\text{ДВ}}+1622,9$	0,88
5	$P_{\text{ПР}}=142,67 \cdot M_{\text{ДВ}}+687,71$	0,98
6	$P_{\text{ПР}}=124,88 \cdot M_{\text{ДВ}}+202,01$	0,87
7	$P_{\text{ПР}}=79,252 \cdot M_{\text{ДВ}}+2278,5$	0,95
8	$P_{\text{ПР}}=76,48 \cdot M_{\text{ДВ}}-9367,9$	0,89
9	$P_{\text{ПР}}=130,14 \cdot M_{\text{ДВ}}-1627,7$	0,95
10	$P_{\text{ПР}}=149,79 \cdot M_{\text{ДВ}}+256,74$	0,97

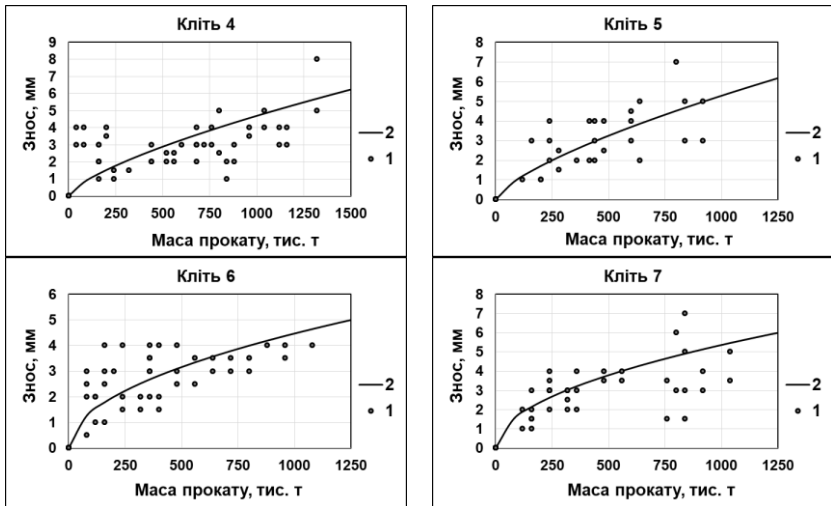


Рисунок 4 – Знос вкладишів шпинделів останньої кліті чорнової групи (№4) і перших трьох клітей чистової групи (№5-7). 1 – експериментальні дані; 2- розрахункові дані.

### Висновки

В Інституті чорної металургії розроблена комп'ютерна система оптимізації режимів гарячої прокатки штаб і прогнозування залишкового ресурсу обладнання широкоштабового стана гарячої прокатки.

Основними функціями комп'ютерної системи є:

- адаптація моделей енергосилових параметрів процесу прокатки;
- верифікація моделей за фактичним сортаментом;
- розрахунки енергосилових параметрів за адаптованими моделям;
- оптимізація режимів прокатки за основними критеріями (перерозподіл обтиснень між клітями для забезпечення допустимих значень енергосилових параметрів прокатки, корегування швидкості прокатки для забезпечення цільової температури завершення прокатки, забезпечення максимальної продуктивності стана);
- розрахунки числа циклів навантажень елементів в обладнанні стана;
- оцінка залишкового ресурсу обладнання з урахуванням його вихідних значень.

Розроблена комп'ютерна система була випробувана на одному з діючих ШСГП. Для цього було налагоджено передачу вихідних даних, які містяться в промислових базах в розроблену комп'ютерну систему моніторингу залишкового ресурсу. Випробування показало достатньо високу надійність прогнозування енергосилових параметрів прокатки штаб і оцінки залишкового ресурсу обладнання і лінії приводу валків робочих клітей.

#### Перелік посилань

1. Воробей С. О., Приходько І. Ю., Разносілін В. В. Особливості технологічних схем та обладнання для виробництва тонких горячекатаних штаб на ШСГП. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2020. Вип. 34. С. 159-169. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2020-34-159-169>
2. Коновалов Ю. В. *Справочник прокатчика : справочное издание* [в 2 кн.]. Кн. 1: Производство горячекатаных листов и полос. Москва : «Теплотехник». 2008. 640 с.
3. Воробей С. А., Левченко Г. В. Особенности расчета энергосиловых параметров горячей прокатки тонких полос. *Теория и практика металлургии*. 2007. № 2-3. С. 86-91.
4. Крот П. В., Коренной В. В. Вибродиагностика прокатных станов на основе нелинейных эффектов в динамике. *Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Динаміка та міцність машин*. 2016. № 26. С. 118-123. <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2016.26.82743>
5. Krot P., Prykhodko I., Raznosilin V., Zimroz R. Model Based Monitoring of Dynamic Loads and Remaining Useful Life Prediction in Rolling Mills and Heavy Machinery. A. Ball, L. Gelman, B. Rao (eds.). *Advances in Asset Management and Condition Monitoring. Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2020. vol 166. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-57745-2\\_34](https://doi.org/10.1007/978-3-030-57745-2_34)
6. Эффективность электрической машины. [electromechanics.ru](http://electromechanics.ru) : веб-сайт. URL:

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2021. – Випуск 35  
 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2021. – Vypusk 35  
 «Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2021. – Collection 35



<https://www.electromechanics.ru/direct-current/237-efficiency-of-electric-machines.html>.

7. КПД двигателей постоянного тока. vuzlit.ru : веб-сайт. URL: [https://vuzlit.ru/754959/dvigatelay\\_postoyannogo\\_toka](https://vuzlit.ru/754959/dvigatelay_postoyannogo_toka).

### References

1. Vorobei S.A., Prykhodko I.Yu., Raznosilin V.V. (2020). Osoblyvosti tekhnolohichnykh skhem ta obladnannya dlya vyrobnytstva tonkykh haryachekatanykh shtab na SHS·HP [Features of technological schemes and equipment for the production of thin strips on hot strip mill]. *Fundamentalni ta prykladni problemy chornoyi metalurhiyi [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy]*, 2020, 34, 159-169. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2020-34-159-169> [in Ukrainian].
2. Kononov Yu.V. (2008). *Spravochnik prokatchika. Proizvodstvo goryachekatanykh listov i polos [Directory of the distributor. Production of hot rolled sheets and strips] (Vols 1-2)*. Moscow: Teplotechnic, 2008, 640 p. [in Russian].
3. Vorobei S.A., Levchenko G.V. (2007). Osobennosti rascheta energosilovykh parametrov goryachey prokatki tonkikh polos [Features of the calculation of power parameters of hot rolling of thin strips]. *Teoriya i praktika metallurgii [Theory and practice of metallurgy]*, 2007, 2-3, 86-91 [in Russian].
4. Krot P.V., Korennoi V.V. (2016). Vibrodiagnostika prokatnykh stanov na osnove nelineynykh effektov v dinamike [Vibrodiagnostics of rolling mills on the basis of nonlinear effects in dynamics]. *Visnik NTU «KHPI». Seriya: Dinamika ta mitsnist' mashin [Bulletin of NTU "KhPI". Series: Dynamics and strength of machines]*, 2016, 26, 118-123. <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2016.26.82743> [in Russian].
5. Krot P., Prykhodko I., Raznosilin V., Zimroz R. (2020). Model Based Monitoring of Dynamic Loads and Remaining Useful Life Prediction in Rolling Mills and Heavy Machinery. A. Ball, L. Gelman, B. Rao (Eds.). *Advances in Asset Management and Condition Monitoring. Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2020, vol. 166. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-57745-2\\_34](https://doi.org/10.1007/978-3-030-57745-2_34)
6. Efficiency of an electric machine. Retrieved from <https://www.electromechanics.ru/direct-current/237-efficiency-of-electric-machines.html>.
7. Efficiency of DC motors. Retrieved from [https://vuzlit.ru/754959/dvigatelay\\_postoyannogo\\_toka](https://vuzlit.ru/754959/dvigatelay_postoyannogo_toka).

**I. Yu. Prykhodko**, Dr. Sci. (Engin.), Senior Research Scientist, Head of Department, ORCID 0000-0001-5651-8106

**S. O. Vorobei**, Dr. Sci. (Engin.), Senior Researcher, ORCID 0000-0003-0119-3935

**V. V. Raznosilin**, Junior Researcher, ORCID 0000-0002-4463-4588

**V. V. Korennoy**, Researcher, ORCID 0000-0002-8329-781X

*Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine*

## COMPUTER SYSTEM OF MONITORING THE RESIDUAL RESOURCE OF EQUIPMENT OF STRIP MILL

**Summary.** The purpose of the work is to develop a computer system for calculating and optimizing the hot rolling modes of the headquarters, forecasting and increasing the residual life of rolling mill equipment. It is shown that in recent years there has been a steady increase in the production of hot-rolled staffs of high-strength steels and especially thin staffs. Mastering the production of such strips leads to an increase in the load on the equipment of rolling mills. The result is increased wear of equipment elements and their premature failure. The Institute of Ferrous Metallurgy of the National Academy of Sciences of Ukraine has developed a computer system for online monitoring of the residual resource of the wide strip hot rolling mill. The main functions of the computer system are: adaptation of models of power parameters of the rolling process; verification of models according to the actual assortment; calculations of power parameters according to adapted models; optimization of rolling modes to ensure the allowable values of power parameters of rolling and the target temperature of completion of rolling, the maximum productivity of the mill; calculations of the number of load cycles of elements in the equipment of the mill; estimation of the residual resource of the equipment taking into account its initial values. The following schematization methods were chosen for the design of the residual resource forecasting system: for dynamic loads - the method of allocation of complete cycles, for static loads - the method of extremes. All objects of the drive line which are diagnosed are divided into three classes: details which can be both separately, and as a part of knots or units; units that can be both separately and as part of units; units consisting of parts and assemblies. The calculation of the residual resource is performed only for details. The residual life of the node or unit is determined by the part that is part of it and has the smallest residual life. The developed computer system was tested on one of the existing hot strip mills. To do this, the transfer of source data contained in industrial databases to the developed computer system for monitoring the residual resource was established. The test showed a fairly high reliability of forecasting the power parameters of the rolling headquarters and the assessment of the residual life of the equipment and the drive line of the rolls of the working stands.

**Keywords:** hot strip mill, technological parameters, resource of equipment

**For citation:** *Prykhodko I.Yu., Vorobei S.O., Raznosilin V.V., Korennoy V.V.* Komp'yuterna sistema monitorynhu zalyshkovoho resursu obladnannya shyrokoshtabovoho stana [Computer system for monitoring the residual life of large-scale equipment]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy chornoj metallurgii* [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy], 2021, 35, 149-158. (In Ukrainian). DOI 10.52150/2522-9117-2021-35-149-158

*Стаття надійшла до редакції збірника 15.11.2021 року,  
пройшла внутрішнє і зовнішнє рецензування  
(Протокол засідання редакційної колегії збірника  
№ 4 від 22 грудня 2021 року)*

*«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2021. – Випуск 35  
«Fundamental'nye i prikladnye problemy chornoj metallurgii». – 2021. – Vypusk 35  
«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2021. – Collection 35*