

**Автухов А.К.,
Ковалевський ЄВ.,
Борисенко О.С.,
Корнев О.С.**
Державний
біотехнологічний
університет,
м. Харків, Україна
E-mail:
a.k.avtukhov@gmail.com

**АНАЛІТИЧНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ
ДОВГОВІЧНОСТІ ХРОМОНІКЕЛЕВИХ
ФОРМУЮЧИХ ІНСТРУМЕНТІВ ІЗ
ВИКОРИСТАННЯМ СТАТИСТИЧНИХ ТА
РЕГРЕСІЙНИХ МОДЕЛЕЙ**

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-27-100>

УДК 621.746

Автухов А.К., Ковалевський ЄВ., Борисенко О.С., Корнев О.С. Аналітичне прогнозування довговічності хромонікелевих формуючих інструментів із використанням статистичних та регресійних моделей

Анотація. У статті розглянуто проблему забезпечення надійності та прогнозування ресурсу двошарових хромонікелевих прокатних валків виконання ЛПХНд-63, які зазнають інтенсивного механічного, термічного та контактано-втомного зношування в умовах сучасних режимів прокатки. Непередбачувані відмови формуючих інструментів зумовлюють значні економічні втрати, що актуалізує необхідність розроблення методик достовірної оцінки їхнього фактичного стану та прогнозування наробітку.

У роботі проведено аналіз сучасних підходів до підвищення експлуатаційної стійкості валків, який свідчить про домінування напрямів, пов'язаних з удосконаленням матеріалів, хімічного складу та технологій термообробки. Разом із тим, питання прогнозування ресурсу з урахуванням умов та схем експлуатації залишається недостатньо опрацьованим.

На основі статистичних даних досліджено формуючі інструменти, що експлуатувалися у різних комбінаціях чистових та чернових клітей. Проведено оцінку однорідності добірок та взаємозв'язків між технологічними та експлуатаційними параметрами. Встановлено суттєву різницю у варіації показників залежно від схеми застосування формуючих інструментів..

З використанням методів множинної лінійної регресії побудовано модель прогнозування загального наробітку, яка відображає вплив твердості валка, кількості установок у чистовій та черновій клітях. Отримане рівняння дозволяє кількісно оцінювати зміну ресурсу за ключовими параметрами та може бути застосоване для оптимізації технологічних схем використання валків ЛПХНд-63.

Ключові слова: формуючі інструменти, ресурс, працездатність, методики прогнозування, технологічні характеристик, експлуатаційні характеристики, лінійні регресії

Avtukhov A.K., Kovalevsky E.V., Borisenko O.S., Kornev O.S. Analytical forecasting of the durability of chromium-nickel forming tools using statistical and regression models.

Abstract. The article considers the problem of ensuring the reliability and forecasting the resource of two-layer chromium-nickel rolling rolls of the LPHND-63 design, which are subject to intensive mechanical, thermal and contact-fatigue wear under modern rolling conditions. Unforeseen failures of forming tools cause significant economic losses, which makes it necessary to develop methods for reliable assessment of their actual condition and forecasting of operating time.

The paper analyzes modern approaches to increasing the operational stability of rolls, which indicates the dominance of directions related to the improvement of materials, chemical composition and heat treatment technologies. At the same time, the issue of forecasting the resource taking into account the conditions and operating schemes remains insufficiently studied.

Based on statistical data, forming tools operated in various combinations of finishing and roughing stands were investigated. The homogeneity of the selections and the relationships between technological and operational parameters were assessed. A significant difference in the variation of indicators depending on the scheme of application of forming tools was established.

Using multiple linear regression methods, a model for predicting the total operating time was constructed, which reflects the influence of roll hardness and the number of installations in finishing and roughing stands. The obtained equation allows quantitatively assessing the change in resource by key parameters and can be used to optimize technological schemes for using LPHND-63 rolls.

Keywords: *forming tools, resource, performance, forecasting methods, technological characteristics, operational characteristics, linear regressions*

Постановка проблеми.

Ефективність роботи сучасних прокатних станів значною мірою визначається надійністю та довговічністю формуючих інструментів, серед яких прокатні валки займають ключове місце. Хромонікелеві валки широко застосовуються в чорній металургії завдяки поєднанню високої твердості, стійкості до термічних навантажень та підвищеної зносостійкості. Проте інтенсивні режими прокатки, зростання швидкостей деформації, підвищені температури та контактні навантаження зумовлюють прискорення процесів механічного, термічного й контактено-втомного зношування таких валків. Це актуалізує необхідність достовірної оцінки їх фактичного ресурсу та можливості його прогнозування [1-4].

Непередбачувані відмови формуючих інструментів призводять до значних економічних втрат: збільшення простоїв обладнання, виникнення браку прокату, зростання витрат на ремонт і відновлення. Водночас, надмірно часта заміна інструмента без об'єктивного аналізу його реального стану призводить до необґрунтованого споживання матеріальних ресурсів. Тому актуальним є розроблення моделей прогнозування наробітку, що враховують параметри твердості валків, умови прокатки, кількість установок у чернових і чистових клітях та характеристики навантаження.

Сучасні тенденції цифровізації виробництва та розвиток методів аналітики даних відкривають можливості для комплексної діагностики стану валків та побудови математичних залежностей, які дозволяють переходити до проактивних стратегій технічного обслуговування. Визначення та прогнозування ресурсу хромонікелевих прокатних валків є важливим завданням для забезпечення стабільної якості прокатної продукції, підвищення економічної ефективності та зниження ризику аварійних ситуацій.

Отже, дослідження закономірностей втрати працездатності формуючих інструментів та розроблення методик прогнозування їх ресурсу є актуальним як з наукової, так і з виробничої точки зору та має суттєве практичне значення для підприємств металургійної галузі.

Формування мети дослідження.

Мета роботи: підвищення ресурсу двошарових хромонікелевих валків виконання ЛПХНд-63 за рахунок оптимізації технологічних схем їх використання.

Аналіз останніх досліджень.

Вітчизняні та зарубіжні розробки, що стосуються виробництва, застосування та підвищення терміну служби валків, показують, що реалізація проблеми підвищення їхньої стійкості проводиться в декількох напрямках. Головні з них включають розробку нових та оптимізацію застосовуваних хімічних складів валкових чавунів [5-7]; їх модифікування [8-12]; удосконалення технології виливки та термообробки [13-16].

Значна частина цих розробок базується на дослідженнях експлуатаційної стійкості прокатних валків [17-19].

Дослідження з експлуатаційної стійкості валків стану 2000 виконань ЛПХНд-63, ЛПХНд-71, ЛПХНд-74, які були виготовлені методом стаціонарного виливка показали, що залежно від клітей стану суттєво змінюються умови експлуатації валків (температура металу, що прокочується, швидкість прокатки, тиск, зусилля і момент прокатки, кількість циклів навантаження). Від зміни параметрів експлуатації валка по клітях суттєво залежить їх надійність, а також причини списання за відмовами [19].

Матеріали, наведені в цій роботі показують, що найбільш високі експлуатаційні параметри характерні для валків виконання ЛПХНд-74, а найнижчі – виконання ЛПХНд – 63. Але слід зазначити, що валки виконання ЛПХНд – 74 дещо дорожче виконання ЛПХНд – 71 і майже в 1, 8 рази – виконання ЛПХНд – 63. Це суттєво впливає на рентабельність роботи стану і, у випадку застосування більш дорогих валків, підвищує витрати на виробництво прокату [19].

Результати досліджень.

Дослідження експлуатаційної стійкості формуючих інструментів складний процес, складність якого обумовлена отриманням статистичних даних щодо експлуатаційних характеристик на діючому виробництві.

При проведенні досліджень було отримано інформацію щодо технологічних та експлуатаційних характеристик валків виконання ЛПХНд – 63 за різні періоди експлуатації і різним схемами їх використання. Усього було досліджено працездатність 96 формуючих інструментів. З них 52 використовувались під час експлуатації як в чорнових так і в чистових клітях, а 44 – тільки у чистових. При проведенні досліджень враховували такі показники: наробіток, т; загальне зняття металу, мм; наробіток на 1мм з'єму металу, т/мм; кількість установок; знімання металу за установку, мм; наробіток за установку, т. Отримані данні наведені у таблиці 1.

Розраховані для двох інформаційних масивів даних статистики технологічних та експлуатаційних характеристик наведені в таблиці 1 з якої видно, що більшість середніх значень і середня квадратичних відхилень параметрів характеристики в двох інформаційних масивах близькі між собою. Але слід зазначити, що на себе звертає увагу той факт що для всіх характеристик формуючих інструментів коефіцієнти варіації, що відображають роботу валків в чорнових клітях значно вище ніж для валків, що працюють в чистових клітях. Це пояснюється тим, що розглянуті добірки даних різняться між собою не тільки прикладами експлуатації, а також різнорідні за схемами використання. Одна група валків експлуатувалась в чистовій і чорнових клітях а друга тільки в чистових клітях. Об'єднання таких інформаційних масивів приводить к викривленню розрахункових значень статистик, а саме к зменшенню середніх значень і збільшенню дисперсії оскільки сумуються дані для валків, що працюють тільки в чистовій кліті. Інформація щодо експлуатації формуючих інструментів у чорновій кліті у другому інформаційному масиві таблиці не відображена оскільки має нульові значення.

Таблиця 1

Статистичні параметри технологічних та експлуатаційних характеристик формуючих інструментів виконання ЛПХНл-63

Статистичні параметри технологічних та експлуатаційних характеристик					
середній показник		середнє квадратичне відхилення		коефіцієнт варіації	
Твердість, HSD					
Д1* - 67,9	Д2* - 66,1	Д1* - 2,43	Д2* - 1,93	Д1* - 0,036	Д2* - 0,029
Д3* - 67,9	Д4* - 65,2	Д3* - 2,48	Д4* - 1,31	Д3* - 0,036	Д4* - 0,029
Σ Д1+Д2 - 67,9	Σ Д3+Д4 - 66,7	Σ Д1+Д2 - 2,42	Σ Д3+Д4 - 1,71	Σ Д1+Д2 - 0,036	Σ Д3+Д4 - 0,026
Наробіток загальний, т					
Д1* - 150430	Д2* - 143572	Д1* - 48501	Д2* - 4869	Д1* - 0,322	Д2* - 0,382
Д3* - 74365	Д4* - 74458	Д3* - 2,48	Д4* - 1,31	Д3* - 0,037	Д4* - 0,020
Σ Д1+Д2-147842	Σ Д3+Д4 - 74395	Σ Д1+Д2 - 50586	Σ Д3+Д4 - 23618	Σ Д1+Д2 - 0,342	Σ Д3+Д4 - 0,318
Наробіток у чистовій кліті, т					
Д1* - 52939	Д2* - 45965	Д1* - 10590	Д2* - 28768	Д1* - 0,370	Д2* - 0,626
Д3* - 74365	Д4* - 74458	Д3* - 2,48	Д4* - 1,31	Д3* - 0,037	Д4* - 0,020
Σ Д1+Д2 - 62156	Σ Д3+Д4 - 74395	Σ Д1+Д2 - 23414	Σ Д3+Д4 - 23618	Σ Д1+Д2 - 0,434	Σ Д3+Д4 - 0,318
Наробіток у чистовій кліті, т					
Д1* - 97491	Д2* - 97606	Д1* - 60690	Д2* - 55973	Д1* - 0,623	Д2* - 0,573
Зняття металу (загальне), мм					
Д1* - 43,4	Д2* - 39,6	Д1* - 8,02	Д2* - 9,18	Д1* - 0,185	Д2* - 0,232
Д3* - 37,2	Д4* - 38,6	Д3* - 9,58	Д4* - 13,40	Д3* - 0,258	Д4* - 0,348
Σ Д1+Д2 - 42,1	Σ Д3+Д4 - 37,4	Σ Д1+Д2 - 8,62	Σ Д3+Д4 - 10,30	Σ Д1+Д2 - 0,207	Σ Д3+Д4 - 0,281
Зняття металу (у чистовій кліті), мм					
Д1* - 27,0	Д2* - 22,2	Д1* - 9,57	Д2* - 12,6	Д1* - 0,354	Д2* - 0,547
Д3* - 37,2	Д4* - 38,6	Д3* - 9,58	Д4* - 13,40	Д3* - 0,258	Д4* - 0,348
Σ Д1+Д2 - 42,1	Σ Д3+Д4 - 37,4	Σ Д1+Д2 - 8,62	Σ Д3+Д4 - 10,30	Σ Д1+Д2 - 0,207	Σ Д3+Д4 - 0,281
Зняття металу (у черновій кліті), мм					
Д1* - 16,4	Д2* - 17,4	Д1* - 9,28	Д2* - 9,45	Д1* - 0,567	Д2* - 0,544
Наробіток на 1мм зняття металу (у чистовій кліті), т/мм.					
Д1* - 1956	Д2* - 1912	Д1* - 323	Д2* - 613	Д1* - 0,165	Д2* - 0,321
Д3* - 1984	Д4* - 1950	Д3* - 328	Д4* - 200	Д3* - 0,165	Д4* - 0,102
Σ Д1+Д2 - 1940	Σ Д3+Д4 - 1973	Σ Д1+Д2 - 447	Σ Д3+Д4 - 292	Σ Д1+Д2 - 0,237	Σ Д3+Д4 - 0,146
Наробіток на 1мм зняття металу (у черновій кліті), т/мм.					
Д1* - 6180	Д2* - 5987	Д1* - 1646	Д2* - 1773	Д1* - 0,266	0,296
Кількість установок (у чистовій кліті)					
Д1* - 15,9	Д2* - 12,6	Д1* - 6,41	Д2* - 8,60	Д1* - 0,403	Д2* - 0,685
Д3* - 19,1	Д4* - 19,6	Д3* - 4,01	Д4* - 6,99	Д3* - 0,210	Д4* - 0,356
Σ Д1+Д2 - 14,7	Σ Д3+Д4 - 19,7	Σ Д1+Д2 - 7,32	Σ Д3+Д4 - 5,01	Σ Д1+Д2 - 0,503	Σ Д3+Д4 - 0,261
Кількість установок (у черновій кліті)					
Д1* - 4,64	Д2* - 4,55	Д1* - 2,82	Д2* - 2,56	Д1* - 0,607	Д2* -
Нарбіток за установку (загальний),т					
Д1* - 24600	Д2* - 25324	Д1* - 5585	Д2* - 3739	Д1* - 0,439	Д2* - 0,348
Д3* - 3822	Д4* - 3798	Д3* - 736	Д4* - 226	Д3* - 0,192	Д4* - 0,059
Σ Д1+Д2 - 8447	Σ Д3+Д4 - 3811	Σ Д1+Д2 - 3760	Σ Д3+Д4 - 614	Σ Д1+Д2 - 0,444	Σ Д3+Д4 - 0,159
Нарбіток за установку (у чистовій кліті),т					
Д1*-3447	Д2*-3880	Д1*-726	Д2*-815	Д1*-0,211	Д2*-0,212
Д3*-3822	Д4*-3798	Д3*-736	Д4*-226	Д3*-0,192	Д4*-0,59
Σ Д1+Д2-1,89	Σ Д3+Д4-2,0	Σ Д1+Д2-0,33	Σ Д3+Д4-0,27	Σ Д1+Д2-0,177	Σ Д3+Д4-0,142
З'єму металу за установку (у чистовій кліті), мм					
Д1* - 1,80	Д2* - 2,05	Д1* - 0,31	Д2* - 0,33	Д1* - 0,171	Д2* - 0,162
Д3* - 1,98	Д4* - 1,96	Д3* - 0,31	Д4* - 0,20	Д3* - 0,159	Д4* - 0,100
Σ Д1+Д2-2,34	Σ Д3+Д4-2,0	Σ Д1+Д2-0,51	Σ Д3+Д4-0,27	Σ Д1+Д2-0,223	Σ Д3+Д4-0,142
З'єму металу за установку (у черновій кліті), мм					
Д1* - 3,48	Д2* - 3,77	Д1* - 0,86	Д2* - 0,83	Д1* - 0,249	Д2* - 0,220

Примітка: Д1 – добірка даних №1; Д2* – добірка даних №2; Д3* – добірка даних №3; Д4* – добірка даних №4; \sum Д1+Д2 – інформаційний масив сумарної добірки даних №1 та \sum Д3+Д4 – інформаційний масив сумарної добірки даних №3 та №4

Щоб перейти до аналізу впливу твердості, і кількості установок на загальний наробіток формуючих інструментів були проаналізовані гіпотези по можливості об'єднання двох добірок даних різного періоду експлуатації та використані за різними схемами в один інформаційний масив.

Дослідження проводили за методикою [20], яка передбачає, що вся в сукупність з двох інформаційних масивів поділяється на інтервали (для виконання розрахунків доцільно прийняти 7 інтервалів), потім у двох стовпцях по цих інтервалах визначається кожна добірка даних окремо і обчислюється критерій перевірки гіпотези χ^2 по залежності

$$\chi^2 = n_1 n_2 \sum_{k=1}^k \frac{1}{m_{1k} + m_{2k}} \left(\frac{m_{1k}}{n_1} - \frac{m_{2k}}{n_2} \right)^2$$

де n_1 та n_2 – обсяг першої та другої вибірок;
 m_{1k} та m_{2k} – частота в інтервалі для першої та другої добірок даних;
 k – кількість інтервалів розбиття сукупної добірки даних.

Гіпотеза про однорідність двох добірок даних приймається, якщо за заданим рівнем значущості α дотримується нерівність:

$$\chi^2 < \chi^2_{\alpha; k-1}$$

де $k-1$ – число ступенів свободи, а $\chi^2_{\alpha; k-1}$ – табличне значення критерію за відповідним рівнем значущості α .

Для перевірки гіпотези та рівності середніх значень випадкової величини у двох добірках даних проводили, насамперед, розрахунок статистик з кожної добірки даних. На наступному етапі перевіряли гіпотези про рівність дисперсій двох добірок даних за критерієм Фішера $F = S_1^2 / S_2^2$, який має F-розподіл с $k_1 = n_1 - 1$ та $k_2 = n_2 - 1$ ступенями свободи, де S_1^2 , n_1 та S_2^2 , n_2 відповідно дисперсії ($S_1^2 > S_2^2$) та обсяги двох добірок даних.

При прийнятому рівні значущості α гіпотеза щодо рівності дисперсій двох добірок даних підтверджувалась, якщо $F < F_{\alpha; k_1; k_2}$, де $F_{\alpha; k_1; k_2}$ – табличні значення критерію. Потім перевірялась гіпотеза щодо рівності середніх значень випадкової величини двох вибірок, при цьому якщо гіпотеза рівності дисперсії не була відкинута для перевірки гіпотези рівності середніх обчислюється критерій Стюдента

$$t = \frac{x_1 - x_2}{s} \sqrt{n_1 \cdot n_2 / (n_1 + n_2)}$$

де

$$s = \sqrt{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2 / (n_1 + n_2 - 2)}$$

Умовою прийняття гіпотези про рівність середніх є нерівність $|t| < t_{\alpha/2; k}$, де $t_{\alpha/2; k}$ – табличні значення критерію Стюдента або рівня значущості α с числом ступенів свободи $k = n_1 + n_2 - 2$.

При аналізі взаємних зв'язків характеристик формуючих інструментів використовували графі кореляційних зв'язків, до яких входять тільки зв'язки виявлені при рівні 005.

Для розрахунку критеріїв перевірки гіпотез використовували значення статистичних показників за певний період експлуатації, що наведені в таблиці 1. Розраховані та табличні значення критеріїв про рівні значимості 0,05 наведені у таблиці 2.

Таблиця 2

Результати розрахунків щодо перевірки гіпотези рівності середніх значень у дослідних добірках даних

Технологічні та експлуатаційні характеристики формуючих	Статистика добірок даних				Критерії та допоміжні параметри							Гіпотеза щодо рівності *	
	X_I	S_I	X_2	S_2	F	k_1/k_2	$F_{0,05}; k_1, k_2$	S	t	$K(k^1/c)$	$F_{0,05}; k$	середніх	дисперсій
Інформаційний масив, що складається з добірок даних Д1* та Д2*													
Твердість, HS D	67,9	2,43	66,1	1,93	1,59	32/19	2,05	2,57	2,81	50	2,01	(+)	(+)
Загальний наробіток, т	1504330	48501	143572	54869	1,28	19/32	1,92	52586	0,46	51	2,00	(+)	(+)
Зняття металу, мм	43,4	8,02	39,6	9,18	1,31	19/32	1,92	8,77	1,53	51	2,00	(+)	(+)
Кількість установок	20,5	5,42	17,1	8,08	2,22	19/32	1,92	6,54	1,83	50	2,00	(+)	(+)
Інформаційний масив, що складається з добірок даних Д3* та Д4*													
Твердість, HSD	67,9	2,48	66,8	131	3,58	29/13	2,39	2,19	3,82	43	2,01	(+)	(+)
Загальний наробіток, т	74365	23104	74458	25642	1,23	13,29	2,08	24884	0,01	42	2,02	(+)	(+)
Зняття металу, мм	37,2	9,58	38,6	13,4	1,96	13,29	2,08	12,3	0,35	42	2,02	(+)	(+)
Кількість установок	19,1	4,01	19,6	6,99	3,04	13,29	2,08	5,12	0,24	41	2,02	(+)	(+)

* Гіпотеза приймається – (+), не приймається – (-)

Для побудови рівняння регресії, що описує вплив твердості (HSD), кількості установок у чистовій кліті (N_1) та кількості установок у черновій кліті (N_2) на загальний наробіток (N_3), використовували модель множинної лінійної регресії.

Розрахунок коефіцієнтів виконували за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення в пакеті "Аналіз даних" MS Excel,

На основі розрахунків було отримуємо рівняння множинної лінійної регресії:

$$N_3 = -183570 + 5293.4 \text{ HSD} - 2053.4 N_1 + 9345.5 N_2$$

Аналіз коефіцієнтів, що показують вплив кожного фактора на загальний наробіток засвідчив:

- збільшення твердості на 1 одиницю (за умови, що показники N_1 та N_2 не змінюються) призводить до збільшення загального наробітку (N_3) в середньому на 5293.4 т. Це відповідає очікуванням, оскільки валки з підвищеним рівнем твердості мають більшу стійкість.

- збільшення кількості установок у чистовій кліті (N_1) на 1 одиницю (за умови, що HSD і N_2 не змінюються) призводить до зменшення загального наробітку (N_3) в середньому на 2053.4 т. Це може свідчити про те, що кількість установок в чистовій кліті при використанні формуючих інструментів треба ретельно розраховувати.

- збільшення кількості установок у черновій кліті (N_2) на 1 одиницю ((за умови, що HSD і N_1 не змінюються) призводить до збільшення загального наробітку (N_3) в середньому на 9345.5 т. Це свідчить про те, що валки, які частіше використовуються в черновій кліті, мають більший потенціал для відновлення та менший вплив на втрату їх працездатності.

Висновки

У результаті проведених досліджень підтверджено актуальність проблеми прогнозування ресурсу хромонікелевих двошарових валків виконання ЛПХНд-63, що зумовлено інтенсивністю експлуатаційних навантажень, високими термічними та контактними параметрами процесу прокатки, а також значними економічними втратами у разі непередбачуваних відмов формуючих інструментів.

Аналіз сучасного стану питання показав, що підвищення експлуатаційної стійкості валків реалізується переважно за рахунок удосконалення матеріалів, оптимізації хімічного складу валкових чавунів, покращення технологій вилівки та термообробки. Проте методичні підходи до прогнозування ресурсу валків залежно від технологічних режимів їх застосування потребують подальшого вдосконалення.

На основі опрацювання статистичних даних встановлено, що валки, які експлуатуються за різними схемами (у чистових та/або чернових клітках), характеризуються істотною відмінністю за рівнем варіації експлуатаційних параметрів.

З метою прогнозування загального наробітку валків на основі множинного регресійного аналізу отримано математичну модель, яка має чіткий фізичний зміст і адекватно описує вплив ключових факторів: твердості, кількості установок у чистовій та черновій клітках на загальний ресурс формуючих інструментів.

Отримані результати дозволяють обґрунтовано оптимізувати технологічні схеми застосування валків ЛПХНд-63 для забезпечення підвищення їх ресурсу та покращення економічної ефективності роботи прокатних станів.

Список використаних джерел

1. Proizvodstvo i primeneniye prokatnykh valkov: spravochnik / T. S. Skoblo i dr. Red. T. S. Skoblo. Harkov, 2013. CD № 1. 572 s.

2. Avtukhov A. Analysis of structure formation stability in the centrifugal cast plate rolls of nickel-chromium cast iron when entering inoculant feedings/ A.Avtukhov // Metallurgical and Mining Industry.-2015.-№9-Р.1080-1084.
3. A. Avtukhov, A. Martynenko, V. Bantkovskiy, Y. Kovalevskiy. Influence of cast iron vacuuming on the level of mechanical characteristics of the material of the working layer of doublelayer chromium-nickel rolls. *Technology audit and production reserves* — № 4/1(66), 2022. P 11-14
4. Автухов А.К. Методичні засади оцінки економічної ефективності у технологіях виробництва прокатних валків / А.К. Автухов // Актуальні проблеми інноваційної економіки. – 2017. - №2. – С.25-31.
5. Чавун робочого шару двошарових прокатних валків: Пат. №101550 Україна, МПК (2015.01) С22С37/06, С22С37/08, С22С37/10 № у 2015 00918; заявл. 05.02.2015; опубл. 25.09.2015, Бюл. №18.
6. Avtuhov A.K. Obobshenie razrabotok po ispolzovaniyu i proizvodstvu hromonikelevogo chuguna dlya izgotovleniya prokatnyh valkov. Resursozberigayuchi tehnologiyi, materialy ta obladnannya u remontnomu virobnictvi: Visnik HNTUSG H.: HNTUSG, 2017. Vip.183. S. 64-76.
7. Автухов А.К., Скобло Т.С. Особливості розподілу хімічних елементів у фазах відцентроволитих валків з хромонікелевого модифікованого чавуну. *Збірник тез доповідей VII Всеукраїнській науково практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Підвищення надійності машин і обладнання»* : Крапивницький: ЦНТУ, 2018. С .137
8. Primenenie shlakoobrazuyushih smesey pri proizvodstve i renovacii izdelij: monografiya / T. S. Skoblo, A. K. Avtuhov i dr.; Pod red. d.t.n., prof. T. S. Skoblo. Harkov: «Polosataya tipografiya», 2016. 284s.
9. Skoblo T. S., Avtuhov A. K., Sokolov R. G. Vliyanie modifikatorov novogo pokoleniya Superseed® 75 i Reseed® na strukturu metalla centrobezhnolityh listoprokatnyh valkov. Litejnoe proizvodstvo. 2015. №2. S. 12-14.
10. Elkem ASA Research. Модификатор Superseed®Inoculant [Текст] / ИТБ "Литьє України", 2003. – № 11 (39)
11. Elkem ASA Research. Модификатор Foundrisil®Inoculant [Текст] / ИТБ "Литьє України", 2004. – № 2 (42)
12. Elkem ASA Research. Модификатор Reseed®Inoculant [Текст] / ИТБ "Литьє України", 2004. – № 7 (47)
13. Спосіб виробництва прокатних валків: Пат. №105761 Україна, МПК (2016.01) В21В27/00, В22D 23/00 № у 2015 07442; заявл. 24.07.2015; опубл.11.04.2016, Бюл. №7.
14. Skoblo T. S., Avtuhov A. K., Sokolov R. G. Vliyanie tehnologicheskikh parametrov otlivki dvuhslojnyh valkov na ih tverdost i koercitivnuyu silu. Problemi nadijnosti mashin ta zasobiv mehanizaciyi silskogospodarskogo virobnictva: Visnik HNTUSG H.: HNTUSG, 2014. Vip. 151. S. 108-113.
15. Ocenka vliyaniya parametrov otlivki dvuhslojnyh listoprokatnyh valkov na skorost kristallizacii i raspredelenie ostatochnykh napryazhenij. Skoblo T. S. Avtuhov A. K. i dr. Stal. 2016. №10. S. 34-38.
16. Автухов А.К. Оптимізація технологічних параметрів виготовлення прокатних валків з хромонікелевого чавуну. *Проблеми математичного моделювання*: матеріали Всеукр. наук.-метод. конф., м. Кам'янське 23-25 трав. 2018 р. Кам'янське: ДДТУ, 2018. С.178
17. Skoblo T. S. Avtuhov A. K., Klimanchuk V. V. Prichiny i harakteristika otkazov listoprokatnyh valkov stanov goryachej prokatki. Metallurgiya mashinostroeniya. 2014. №3. S. 14-17.

18. Skoblo T. S., Avtuhov A. K., Sokolov R. G. Analiz ekspluatacionnoj stojkosti dvuhslojnyh chugunnyh valkov. Stal. 2015. №2. S. 34-37.
19. Skoblo T. S., Avtuhov A. K., Sokolov R. G. Opyt ekspluatatsii rabochih valkov stana 2000. Nauchniyat potencial na sveta-13. Materiali za IH mezhdunarodna nauchna praktichna konferenci. Bolgariya. 2013. Tom 20. S. 13-27.
20. Автухов А.К., Ковалевський Є.В. Розробка методики дослідження технологічних та експлуатаційних характеристик формуючих інструментів станів гарячої прокатки. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів* — № 25, 2024. С 43-49

References

1. Skoblo T.S., Sidashenko A.I., Aleksandrova N.M., Belkin E.L., Vlasovets V.M., Klochko O.Yu., Martynenko A.D. (2013). Production and application of rolling rolls. Reference book. Ed. Prof. T.S. Skoblo. Kharkiv. Izd. CD No. 1. 572 p.
2. Avtukhov A. Analysis of structure formation stability in the centrifugal cast plate rolls of nickel-chromium cast iron when entering inoculant feedings/ A.Avtukhov // Metallurgical and Mining Industry.-2015.-№9-P.1080-1084.
3. A. Avtukhov, A. Martynenko, V. Bantkovskiy, Y. Kovalevskiy. Influence of cast iron vacuuming on the level of mechanical characteristics of the material of the working layer of doublelayer chromium-nickel rolls. *Technology audit and production reserves* — № 4/1(66), 2022. P 11-14
4. Avtukhov A.K. Methodological principles of assessing economic efficiency in technologies for the production of rolling rolls / A.K. Avtukhov // Actual problems of innovative economy. – 2017. - No. 2. – P.25-31.
5. Cast iron of the working layer of two-layer rolling rolls: Pat. No. 101550 Ukraine, МРК (2015.01) C22C37/06, C22C37/08, C22C37/10 No. u 2015 00918; appl. 05.02.2015; publ. 25.09.2015, Bull. No. 18.
6. Avtukhov A.K. Generalization of developments on the use and production of chromium-nickel cast iron for the manufacture of rolling rolls. Resource-saving technologies, materials and equipment from repair manufacturing: Newsletter of KhNTUSG Kh.: KhNTUSG, 2017. Issue 183. pp. 64-76.
7. Avtukhov A.K., Skoblo T.S. Features of the distribution of chemical elements in the phases of centrifugally cast rolls made of chromium-nickel modified cast iron. Collection of abstracts of reports to the VII All-Ukrainian scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists "Improving the reliability of machines and equipment": Krapivnytskyi: TsNTU, 2018. P. 137
8. Application of slag-forming mixtures in the production and renovation of products: monograph / T. S. Skoblo, A. K. Avtukhov et al.; Ed. by Doctor of Technical Sciences, Professor T. S. Skoblo. Kharkov: "Striped Printing House", 2016. 284 p.
9. Skoblo T.S., Avtukhov A.K., Sokolov R.G. Influence of new generation modifiers Superseed® 75 and Reseed® on the structure of metal of centrifugally cast sheet rolling rolls. Foundry production. 2015. No. 2. P. 12-14.
10. Elkem ASA Research. Superseed® Inoculant Modifier [Text] / ITB "Casting of Ukraine", 2003. - No. 11 (39)
11. Elkem ASA Research. Foundrisil® Inoculant Modifier [Text] / ITB "Casting of Ukraine", 2004. - No. 2 (42)
12. Elkem ASA Research. Reseed® Inoculant Modifier [Text] / ITB "Casting of Ukraine", 2004. - No. 7 (47)
13. Method of manufacturing rolling rolls: Pat. No. 105761 Ukraine, МРК (2016.01) B21B27/00, B22D 23/00 No. u 2015 07442; appl. 24.07.2015; publ. 11.04.2016, Bull. No. 7.

14. Skoblo T. S., Avtukhov A. K., Sokolov R. G. Influence of technological parameters of casting of double-layer rolls on their hardness and coercive force. Problems of reliability of machines and means of mechanization of agricultural production: Bulletin of KhNTUSG Kh.: KhNTUSG, 2014. Issue 151. Pp. 108-113.

15. Evaluation of the influence of casting parameters of two-layer sheet-rolled rolls on the rate of crystallization and distribution of final stresses. Skoblo T. S. Avtukhov A. K. and others Stal. 2016. No. 10. P. 34-38.

16. Avtukhov A.K. Optimization of technological parameters for the production of rolling rolls from chromium-nickel cast iron. Problems of mathematical modeling: materials of the All-Ukrainian Scientific-Methodological Conference, Kamianske, May 23-25, 2018. Kamianske: DSTU, 2018. P.178

17. Skoblo T. S. Avtukhov A. K., Klymanchuk V. V. Causes and characteristics of failures of sheet-rolled rolls of hot rolling mills. Machine-building metallurgy. 2014. No. 3. P. 14-17.

18. Skoblo T. S., Avtukhov A. K., Sokolov R. G. Analysis of operational durability of two-layer cast iron rolls. Steel. 2015. No. 2. P. 34-37.

19. Skoblo T. S., Avtukhov A. K., Sokolov R. G. Experience in the use of workers' rolls of the year 2000. Nauchniyat potencial na sveta-13. Materials for the IX international scientific practical conference. Bulgaria. 2013. Volume 20. P. 13-27.

20. Avtukhov A.K., Kovalevsky E.V. Development of a methodology for studying the technological and operational characteristics of forming tools of hot rolling mills. Technical Service of Agro-Industrial, Forestry and Transport Complexes — No. 25, 2024. P. 43-49.