

УДК 621.771

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-2-9>

ПРУЖНА ДЕФОРМАЦІЯ ЧИСТОВИХ КЛІТЕЙ ТЗС 900/750

Штода Максим Миколайович,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри металургії, матеріалознавства та організації виробництва
ТОВ «Технічний університет «Метінвест політехніка»
ORCID ID: 0000-0002-3918-2492

Штода Ірина Іванівна,

завідувач лабораторії кафедри металургії ім. проф. В.І. Логінова
Дніпровський державний технічний університет

Зараз у світі прокатка квадратної та круглої заготовки майже повністю витіснена продукцією машин безперервного лиття заготовок (МБЛЗ). У цих умовах трубнозаготовельні стани (ТЗС) змушені змінювати сортамент і освоювати нові види прокатної продукції. Під час перепрофілювання трубнозаготовельних станів постає питання відповідності обладнання вимогам сортового стану. Зокрема, відповідність щодо жорсткості клітей. Висока жорсткість, знання і контроль «пружини» стану дозволяють підвищити точність прокатки, зменшити кількість металу, що витрачається на налагодження. Метою роботи є дослідження чистових клітей ТЗС 900/750 ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» на відповідність вимогам жорсткості до клітей профільних станів і визначення можливості прокатки в них профілів із підвищеними вимогами допусків на розміри. У роботі запропоновано новий розрахунково-експериментальний метод визначення жорсткості прокатної кліті. Застосування цього методу дозволило вперше визначити жорсткість чистових клітей ТЗС 900/750 ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ». Показано, що обладнання трубнозаготовельних станів відповідає вимогам сортових станів. На основі запропонованого розрахунково-експериментального методу визначення «пружини» прокатної кліті розроблено математичну модель для розрахунку зазора клітей 750–1, 2 і 3, яка реалізована в Excel. Дана модель дозволяє визначати зазори між валками перед прокаткою з точністю до 5%. Результати роботи дозволять зменшити об'єм металу для налагодження стану на 50% (на 2,4 т). Тобто витратний коефіцієнт зменшиться в середньому на 0,8%.

Ключові слова: «пружина» кліті, спосіб налагодження кліті, профіль великого перерізу.

Shtoda Maksym, Shtoda Iryna. Elastic Deformation of Finishing Stands Tube Billet Mill (TBM) 900/750

The rolling square and round billets is almost completely replaced by continuous casting machine (CCM) products now in world. Under these conditions, the tube billet mills (TBM) are forced to change their assortment and produce new types of rolled products. The question arises of compliance of the equipment with the requirements of the section rolling mill during the repurposing of the TBM. It becomes relevant compliance with the stiffness of stands. The high stiffness, knowledge, and control of the “spring” of the mill improves the accuracy of rolling, reduces the amount of metal spent on setting. The work aims to study the finishing stands TBM 900/750 PJSC “KAMET-STEEL” for compliance with the stiffness requirements for section mill stands, and to determine the possibility of rolling profiles with increased requirements for dimensional tolerances in them. The work proposes a new theoretical and experimental method for determining the rigidity of a rolling stand. The use of this method made it possible for the first time to determine the stiffness of stands 750 of the TBM 900/750 of PJSC “KAMET-STEEL”. It is shown that the rigidity of stands 750 meets the requirements of section mills. Based on the proposed computational and experimental method of determining the rolling stand “spring”, a mathematical model was developed for calculating the gap of the stands 750–1, 2, and 3, which is implemented in Excel. This model allows you to determine the gaps in stands 750–1, 2, and 3 before rolling with an accuracy of up to 5%. The results of the work allows for a reduction of the volume of metal for setting up the stand by 50% (by 2,4 tons). Eventually, the expense ratio shall be decreased by an average of 0,8%.

Key words: stand “Spring”, stand setting method, large section profile.

За даними Всесвітньої асоціації сталі [1], у 2015 р. в загальному обсязі гарячекатаного профілю, який становив 1 599 340 тис. тон, більше 51% було виготовлено у вигляді сортового прокату. Як свідчить статистика минулих років [1], у структурі сортового прокату переважали дрібні

та середні профілі простої форми поперечного перерізу (круглі, арматурні, катанка). Профілі такого типу, як квадратна і кругла заготовки, практично не виготовлялися, а нині випускаються в ще менших кількостях, що підтверджують сучасні дослідження (див. рис. 1).

	Million tonnes			% Crude steel output		
	2020	2021	2022	2020	2021	2022
European Union (27)	128.4	148.4	132.3	97.1	97.2	97.1
Other Europe	47.0	52.2	45.8	99.8	99.9	99.9
Ukraine	13.6	14.1	4.7	66.2	66.2	75.2
Canada ^(e)	8.6	10.1	9.4	78.1	78.1	78.0
United States	72.6	85.6	80.3	99.8	99.8	99.7
North America	98.5	114.8	108.5	97.5	97.4	97.4
South America	38.1	44.8	42.4	98.4	98.2	98.0
Africa	18.1	22.3	21.1	100.0	100.0	100.0
Middle East	46.4	47.3	50.4	100.0	100.0	100.0
China ^(e)	1 049.4	1 019.0	1 001.9	98.6	98.4	98.4
India	87.2	110.2	117.2	87.0	93.2	93.7
Japan ^(e)	82.4	95.4	88.4	99.0	99.0	99.0
Asia	1 361.0	1 383.1	1 357.6	97.8	98.1	98.1
Total of above countries	1 824.1	1 891.9	1 824.3	97.0	96.5	96.8

Рис. 1. Виробництво безперервної сталі 2020–2022 рр.

Традиційний спосіб виробництва круглої та квадратної заготовки прокаткою занепадає у світі. Про це свідчить відсутність досліджень процесу прокатки круглих і квадратних заготовок у технічній літературі. Проте переважає кількість досліджень і публікацій, присвячених безперервному розливанню сталі. У роботі [2] зазначається, що у світовій металургійній промисловості поширене виробництво круглої заготовки методом безперервного лиття сталі, яка широко використовується для виготовлення безшовних труб, залізничних коліс, шин, якісного сортового прокату тощо. Це свідчить про те, що такий вид продукції, як прокат квадратної та круглої заготовки, майже цілком витіснений продукцією машин безперервного лиття заготовок (далі – МБЛЗ).

У статті [3] розглядаються перспективи науково-технічного забезпечення розвитку чорної металургії України з урахуванням наслідків військової агресії Російської Федерації. На основі всебічного аналізу сучасного стану галузі визначено можливості впровадження сучасних і перспективних технологій металургійного виробництва запропонованим проектом «Концепція сталого розвитку чорної металургії України». Втрата унікальних для України крупносортових станів через військово-політичну обстановку (Алчевський металургійний комбінат – крупносортовий стан 600, Азовсталь – рейко-балковий стан і крупносортовий стан 650 та інші) змушує розвивати втрачені виробництва. Як варіант для першого етапу виробництва здійснюється на діючих прокатних станах для виготовлення заготовок.

Тобто трубозаготівельний стан 900/750 (ТЗС) ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» змушений змінити свій профіль на виробництво сортових видів прокату або бути закритим. В освоєнні сортового прокату на заготовочних прокатних станах необхідно враховувати, що поле допуску для заготовок значно ширше поля допуску для сортових профілів. Відповідно, обладнання заготовочних станів, передусім прокатних клітей, може не відповідати підвищеним вимогам профільних станів.

Точність прокатки забезпечується насамперед конструкцією прокатної кліті. Зазор між валками кліті залежить від багатьох технологічних параметрів, як-от матеріал прокату, його розміри та температура, швидкість прокатки тощо. Однак основними чинниками в цьому процесі є сила прокатки та пружна характеристика кліті. Знання розмірів розкату і пружної характеристики кліті на практиці підвищує точність прокатки та зменшує витрати металу на налагодження. Отже, прогнозований з високою точністю зазор знижує коефіцієнт витрати металу.

Метою роботи є дослідження пружної деформації чистових клітей ТЗС 900/750 ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» під час прокатки профілів для забезпечення відповідності вимогам жорсткості, що пред'являються до клітей сортових станів, та визначення можливості прокатки профілів із жорсткими допусками на розміри.

Останнім часом проблемам дослідження впливу пружних деформацій прокатного обладнання в умовах експлуатації приділяється велика увага.

У роботі [4] показано актуальність керування пружними моментами в мехатронних системах кліті прокатного стану для запобігання втому руйнуванню механічних з'єднань кліті товстолистового стану 5000. З іншого боку, знання пружних деформацій частин кліті під час прокатки є важливим під час модернізації приводів клітей і підвищення їхньої продуктивності та безаварійності, а також у впровадженні нових систем керування [5], зокрема і шляхом дослідження жорсткості прокатних клітей.

Жорсткість кліті впливає на точність прокатки разом із силовими параметрами. Як відомо, умови контакту металу та валків суттєво впливають на силу, момент і потужність прокатки [6].

Автоматизовані системи керування вимірюють основні параметри процесу прокатки: швидкість, силу, момент прокатки та зміну зазора між валками [7]. Потім розраховується повна пружна деформація кліті під час прокатки та будується пружна характеристика кліті. Відповідно до цього налагоджується кліть. Завдяки чому підвищується точність прокату.

У статті [11] розглянуто динамічну модель радіально-упорного кулькового підшипника. Показано, що конструктивні й експлуатаційні особливості суттєво впливають на жорсткість несучої опори.

З аналізу літературних джерел можна зробити висновок, що на точність прокатних виробів найбільше впливає жорсткість прокатного обладнання. Контроль точності у процесі прокатки можливий шляхом поєднання систем автоматизації та результатів моделювання.

ТЗС 900/750-3 був уведений в експлуатацію в 1956 р. Стан розташований послідовно за обтисковою кліттю 1150. Призначений для виробництва трубної заготовки, квадратних заготовок і слябів із вуглецевих сталей звичайної якості, високоякісної конструкції сталі, низьколегованої та легованої сталі.

Основне технологічне обладнання стану складається з реверсивної двовалкової обтискної кліті 900 і трьох однакових двовалкових нереверсивних клітей 750, розташованих послідовно (рис. 2).

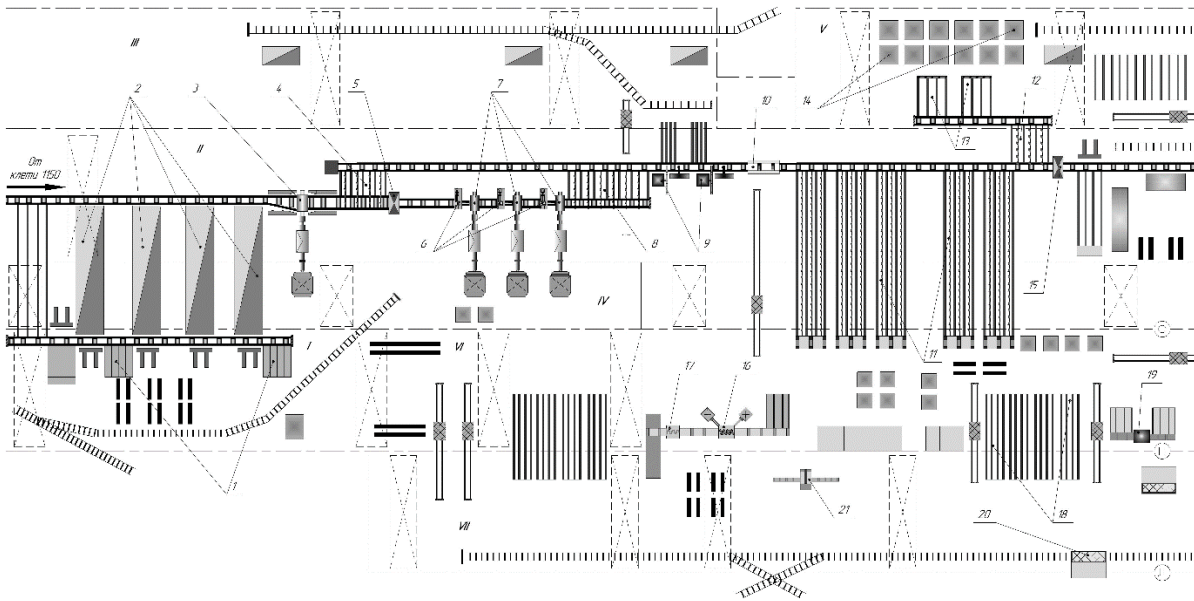


Рис. 2. Схема розташування обладнання ТЗС

- 1 – завантажувальні ґрати; 2 – методичні нагрівальні печі; 3 – кліть 900 (робоча кліть, маніпулятори, шестеренна кліть, електродвигун); 4 – шлепер перед ножицями № 1; 5 – ножиці гарячої різки № 1; 6 – шайбові кантувачі клітей 750–1, 2, 3; 7 – кліті 750–1, 2, 3 (робоча кліть, шестеренна кліть, електродвигун); 8 – шлепер за кліттю 750–3; 9 – пили ударної дії; 10 – клеймувальна машина; 11 – ланцюгові холодильники; 12 – транспортер осьової заготовки; 13 – приймальні столи; 14 – колодязі сповільненого охолодження осьової заготовки; 15 – ножиці гарячої різки № 2; 16 – правильна машина; 17 – установка УЗК; 18 – стелажі для обробки та приймання товарного прокату; 19 – обдирний станок; 20 – вагонні ваги; 21 – стрічкопильний станок

Для опор валків обтискної кліті 900 використовують текстолітові підшипники ковзання (рис. 3-а). А для валків клітей 750–1, 2, 3 застосовують чотирирядні роликопідшипники (рис. 3-б).

Отже, роликові опори кліті 900 не забезпечують високої жорсткості. Водночас жорсткість чистових клітей має відповідати вимогам сучасних сортопрокатних станів. Але для цього потрібні додаткові дослідження.

Для отримання пружних характеристик сучасних прокатних клітей, які оснащені датчиками для вимірювання сили прокатки, заміряють зазор між валками до або після прокатки (без навантаження), висоту розкату після прокатки (для розрахунку зазора під час прокатки) та силу прокатки. Цей метод визначення жорсткості прокатних клітей на досліджуваному об'єкті неможливий, оскільки кліті стану 900/750 не обладнані тензодатчиками.

Пропонується визначати силу прокатки за допомогою розрахунково-експериментального методу визначення жорсткості прокатних клітей, який має такий алгоритм (рис. 4).

Розрахунок сили прокатки може бути виконаний будь-яким відомим методом, який забезпечує найкраще узгодження між розрахунковими

значеннями і фізичним експериментом. Але варто мати на увазі, що будь-який метод має похибку, зумовлену прийнятими в ньому спрощеннями і припущеннями. Необхідно стежити, щоб похибка розрахунку була завжди однаковою, щоб усунути її під час визначення жорсткості стійки. Тому метод розрахунку сили після вибору неможливо змінити.

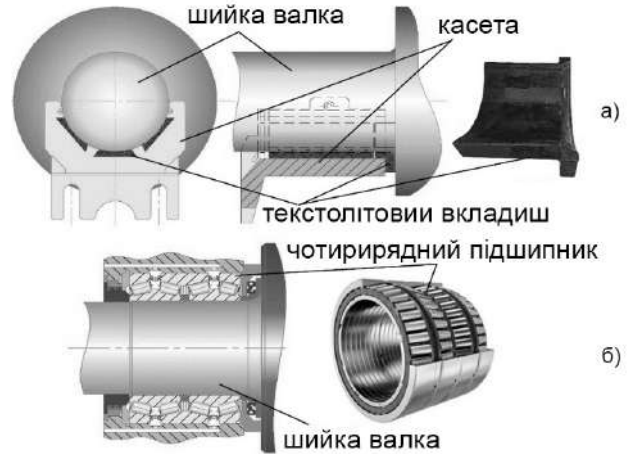


Рис. 3. Підшипникові опори валків обтискної кліті 900 (а) та чистових клітей 750–1, 2, 3 (б)

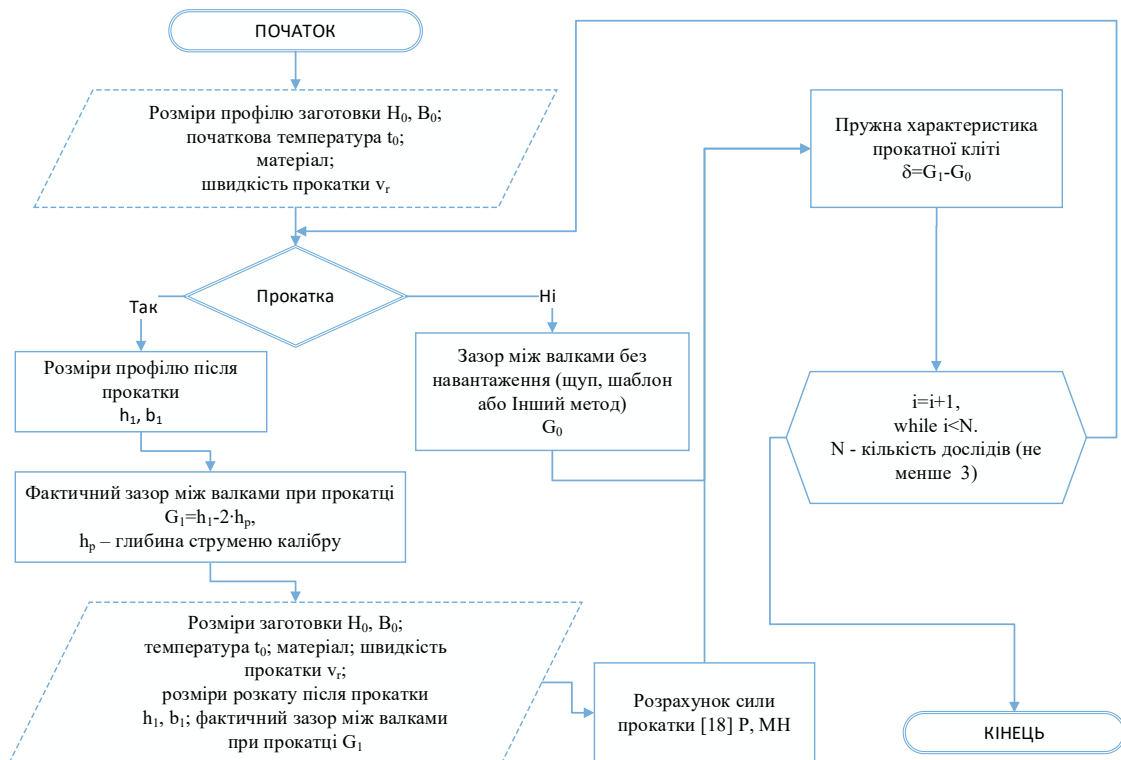


Рис. 4. Алгоритм розрахунково-експериментального методу визначення «пружини» прокатної кліті

Для визначення пружної характеристики клітей 750–1, 2, 3 відповідно до розрахунково-експериментального методу прокатували матеріали за різних умов (табл. 1).

Глибину струменя ящичних калібрів вимірювали до прокатки. Також проводився контроль температури заготовки за допомогою ручного та стаціонарного пірометрів перед гарячою прокаткою. Розміри до і після прокатки для усунення похибки через температурне лінійне розширення визначали в гарячому стані. Результати розрахунків і умови експерименту наведені в табл. 1.

Далі для кожного випадку експерименту розраховували силу прокатки для визначення модуля жорсткості клітей. За результатами розрахунків побудовано графік (рис. 5). Графік являє собою пружну характеристику прокатних клітей 750–1, 2, 3:

$$\delta = 0,08 + 0,61 \cdot P, \quad (1)$$

де P – сила прокатки, розрахована залежно від умов прокатки, МН.

Залежність δ за формулою (1) дозволяє визначити величину пружної деформації кліті під дією сили прокатки, близьку до фактичних значень. Висока точність розрахунків за формулою (1) підтверджується високим значенням коефіцієнта кореляції для залежності, який становить $R^2 = 0,9914$. Це свідчить про майже 100% збіг розрахункових і експериментальних значень.

Товщину розкату після прокатки h_1 можна передбачити, якщо відома «пружина» δ і заданий початковий зазор між валками G_0 :

$$h_1 = G_0 + \delta. \quad (2)$$

Як видно з рис. 5, жорсткість клітей 750–1, 2 і 3 близька до 1 500 кН/мм. Це значення

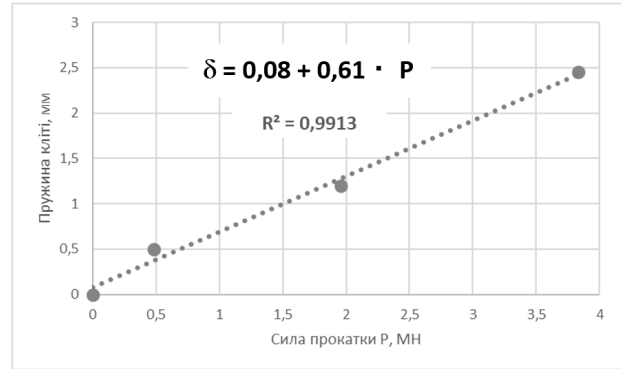


Рис. 5. Залежність пружини кліті 750 ТЗС від сили прокатки

перебуває в діапазоні 1 300–2 000 кН/мм, що характерний для клітей прецизійних прокатних станів Японії [9]. Тобто жорсткість чистових клітей ТЗС відповідає жорсткості клітей сортового стану.

Запропонований спосіб налагодження клітей 750–1, 2 і 3 заснований на визначенні «пружини» кліті. Результати роботи дозволяють зменшити кількість невідповідної продукції під час виготовлення профілів на ТЗС після перевалки та переналагодження валків. Результати роботи дозволяють зменшити об'єм металу на налагодження на 50% (на 2,4 т). У результаті, витратний коефіцієнт зменшиться в середньому на 0,8%.

Розроблено математичну модель для розрахунку величини зазора клітей 750–1, 2 і 3 ТЗС на основі запропонованого розрахунково-експериментального методу визначення «пружини» прокатної кліті. Математична модель реалізована в Excel. Модель дозволяє визначати зазори у клітях 750–1, 2 і 3 безпосередньо на кліті перед прокаткою з точністю до 5%.

Таблиця 1

Результати дослідження пружної деформації кліті 750

Зазор без навантаження, мм	Зазор під час прокатки, мм	Розміри профілю, мм				Матеріал	Температура, °С	Сила прокатки P, МН	Пружина δ , мм
		До прокатки		Після прокатки					
		h_0	b_0	h_1	b_1				
6,0	6,5	10,0	10,0	6,5	17,6	СтЗсп	20	0,48	0,5
7,0	8,2	157,0	108,0	131,5	109,3	70Г	900	1,96	1,2
6,0	8,5	203,0	167,0	172,5	174,5	Ст5пс	920	3,83	2,45

ЛІТЕРАТУРА:

- World Steel in Figures 2023 / World Steel Association AISBL. URL: <https://worldsteel.org/steel-topics/statistics/world-steel-in-figures-2023/>.
- Бірюков О.Б., Іванова А.О. Сучасний стан та напрями розвитку технології безперервного розливання круглої заготовки. *Чорна металургія. Бюлетень науково-технічної та економічної інформації*. 2020. Т. 76. № 6. С. 573–585. DOI: 10.32339/0135-5910-2020-6-573-585.

3. Науково-технічне забезпечення Концепції сталого розвитку чорної металургії України / О.І. Бабаченко та ін. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2022. Збірник 36. С. 4–20. DOI: 10.52150/2522-9117-2022-36-4-20.
4. Digital Observer of Elastic Torque of Rolling Stand Two-Mass System / B. Loginov et al. *Advances in Automation IV*. January 2023. P. 239–249. DOI: 10.1007/978-3-031-22311-2_24.
5. Upgrading the Gear Stand of Hot Rolling Mill 2000 / A. Gerasimova et al. *Proceedings of the 8th International Conference on Industrial Engineering*. January 2023. P. 830–838. DOI: 10.1007/978-3-031-14125-6_81.
6. Influence of emulsols type on energy-power consumption and surface contamination at DC01 steel cold rolling on the continuous four-stand mill / V. Kukhar et al. *Problems of Tribology*. 2022. № 27. P. 19–26. DOI: 10.31891/2079-1372-2022-106-4-19-26.
7. Modernization of laboratory rolling mill 150 for the formation of students 'studies of automation object research / M. Zinchenko et al. *System technologies*. 2021. P. 87–98. DOI: 10.34185/1562-9945-3-134-2021-10.
8. Stiffness analysis of rolling bearing for concrete mixer / Z. Wang et al. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2022. 1242. 012039. DOI: 10.1088/1757-899X/1242/1/012039.
9. Precision strip rolling mill stiffness / CRM (Post time: 2023–02–26). URL: <https://precision-rolls.com/News/127.html>.

REFERENCES:

1. World Steel in Figures 2023 / World Steel Association AISBL, <https://worldsteel.org/steel-topics/statistics/world-steel-in-figures-2023/>.
2. Biriukov, O.B., Ivanova, A.O. (2020). Suchasnyi stan ta napriamy rozvytku tekhnolohii bezperervnoho rozlyvannia kruhloi zahotovky [Modern status and ways of development of round billet production technology by steel continuous casting]. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 76. 573–585. DOI: 10.32339/0135-5910-2020-6-573-585 [in Ukrainian].
3. Babachenko, O.I., Tuboltsev, L.G., Merkulov, O.Ye., Levchenko, G.V. (2022). Naukovo-Technische suprovodzhennia Kontseptsii staloho rozvytku chornoj metalurhii Ukrainy [Scientific and technical support of the Concept of sustainable development of black metallurgy of Ukraine]. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*. Collection 36. P. 4–20 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2022-36-4-20>.
4. Loginov, B., Khramshin, V., Gasiyarova, O., Semitko, A., Gasiyarov, V. (2023). Digital Observer of Elastic Torque of Rolling Stand Two-Mass System. In book: *Advances in Automation IV*, January 2023, pp. 239–249. DOI: 10.1007/978-3-031-22311-2_24.
5. Gerasimova, A., Vasilyev, M., Nagovitsyn, V., Shaibel, C. (2023). Upgrading the Gear Stand of Hot Rolling Mill 2000. In book: *Proceedings of the 8th International Conference on Industrial Engineering*, January 2023, pp. 830–838. DOI: 10.1007/978-3-031-14125-6_81.
6. Kukhar, V., Malii, Kh., Spichak, O. (2022). Influence of emulsols type on energy-power consumption and surface contamination at DC01 steel cold rolling on the continuous four-stand mill. *Problems of Tribology* 27, 19–26. DOI: 10.31891/2079-1372-2022-106-4-19-26.
7. Zinchenko, M., Potap, O., Rybalchenko, M., Manachyn, I. (2021). Modernization of laboratory rolling mill 150 for the formation of students 'studies of automation object research. *System technologies*, P. 87–98. DOI: 10.34185/1562-9945-3-134-2021-10.
8. Wang, Z., He, W., Niu, S. (2022). Stiffness analysis of rolling bearing for concrete mixer. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1242, 012039. DOI: 10.1088/1757-899X/1242/1/012039.
9. Precision strip rolling mill stiffness / CRM (Post time:2023–02–26), <https://precision-rolls.com/News/127.html>.