

Грибков Е. П.
Добронос Ю. К.
Коваленко А. К.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПРАВКИ ПРОКАТУ НА БАГАТОРОЛИКОВИХ ПРАВИЛЬНИХ МАШИНАХ

Правка листового прокату грає важливу роль в формуванні якісних характеристик готової продукції. На сучасних металургійних підприємствах використовуються багатороликові листопрямильні машини з індивідуальним налаштуванням роликів. Цього типу машини мають гнучку систему технологічних налаштувань, що вимагає від математичної моделі процесу правки вирішення задач з автоматизованого проектування. Причому якщо для сталей загальномашинобудівного призначення раціональне значення положення роликів знаходиться в широкому діапазоні, то для високоміцних сталей це дуже вузьке поле, що вимагає від математичної моделі дуже точного результату. Найбільш точними моделями є моделі, засновані на використанні методу скінченних елементів. В роботі була розроблена скінченно-елементна модель процесу правки листів у багатороликовій машині. Для перевірки адекватності розробленої моделі були проведені експериментальні дослідження в лабораторних умовах. Лабораторна установка являла 9-роликову листопрямильну машину з діаметром роликів 100 мм, розташованих з кроком 105 мм. Налаштування роликів призводили за допомогою гвинтового механізму. Дослідження проводили для 5-роликового варіанту машини. Всі ролики були приводними. Експерименти проводили для листів трьох товщин: 2.5, 3.5 та 9.0 мм. Ширина листа для товщини листа 2.5 мм складала близько 150 мм, для інших – 100 мм. Було використано по 4 листа кожної товщини. Вимірювання сили правки здійснювали за допомогою кільцевих месдоз, встановлених між натискним гвинтом та подушкою роликів. Для обробки сигналу був використаний АЦП. Порівняння експериментальних даних процесів правки листів з результатами розрахунків свідчить про їх якісний та кількісний збіг. При цьому похибка розрахунку сили правки на третьому ролику не перевищувала 16,5%. Порівняння показує достатній ступінь надійності розроблених математичних моделей і можливість їх застосування на існуючому промисловому обладнанні.

Ключові слова: лист, правка, правильна машина, математична модель, скінченно-елементна модель, експериментальні дослідження, вимірювання сили.

Основне завдання математичного опису процесу правки листового металопрокату полягає у визначенні енергосилових параметрів, необхідних для проектування обладнання та у визначенні залишкової кривизни листа, необхідної для визначення технологічних налаштувань машини [1].

При моделюванні істотну роль відіграють прийняті граничні умови, до яких відносяться умови тертя, особливості знакозмінної пружно-пластичної деформації та граничні значення обтиснень. Важливим є опис контактних взаємодій. Так, у роботі [2] проведено експериментальні дослідження з тертя між листом та роликками під час правлення. Отримані дані були адаптовані до скінченно-елементного моделювання, надано рекомендації щодо коефіцієнтів тертя для різних матеріалів.

Для оцінки максимально припустимої деформації використовують результати випробувань на міцність. Але досвід показує, що цього недостатньо і потрібно проводити додаткові дослідження. З цією метою в роботі [3] розроблено методика та надано рекомендації з оцінки розтягування кромки сталей різних марок, у тому числі і високоміцних.

Для оцінки нерівномірності деформації по товщині листа в роботі [4] була створена модель зміщення шару з нейтральною напругою на основі теорії триточкового вигину, характеристик вигину сталевих листів та теорії шарів у процесі правки. Явище зміщення шару з нейтральною напругою та взаємозв'язок між радіусом зворотного вигину, товщиною пластини та деформаційною здатністю металу були доведені теоретично та експериментом з правки.

Як методи моделювання правки використовуються чисельні [5] і кінцево-елементні моделі [6] або їх комбінації [7, 8]. Чисельні моделі мають високу швидкодію, що дозволяє їх використовувати в автоматичній системі управління. Скінченно-елементні моделі вимагають великих витрат машинного часу на розрахунок, але дозволяють отримувати точніші результати з широким урахуванням впливу факторів на процес.

Іншим підходом до вирішення завдань з правлення є використання накопичених промислових даних, отриманих на діючому обладнанні. (Deep learning method) було запропоновано використовувати для вдосконалення технології правлення в роботі [9]. Даний підхід заснований на використанні досвіду правлення з найбільш вдалим налаштуваннями листопрավильної машини.

При проектуванні листопрավильних машин найбільш актуальною є завдання визначення технологічних можливостей машини з різними конструктивними параметрами, тобто чи зможе конкретна листопрավильна машина обробити необхідний сортамент. Під час вирішення цього завдання є кілька підходів.

У роботі [10] було запропоновано оптимізаційну модель щодо визначення вирівнюючої здатності листопрավильної машини. Стратегія заснована на визначенні максимальної межі плинності листів, які можуть бути піддані виправленню. Дані граничні криві пов'язані з товщинами листів, максимальним ходом роликів та потужністю приводу.

Важливим, крім проникнення пластичної деформації листа при правці, є облік умов захоплення. Авторами роботи [11] була представлена аналітична модель захоплення листів роликками прավильної машини, яка враховує взаємозв'язок між захопленням роликками та кривизною вигину листа під час протікання процесу. На основі реалізації моделі було побудовано чотиривимірну базу даних оптимальних налаштувань листопрավильної машини з урахуванням граничної пружної кривизни матеріалу листів, а також з урахуванням очікуваного коефіцієнта пластичної деформації.

Завдання щодо визначення технологічних можливостей листопрավильної машини носять оптимізаційний характер і тут істотну роль грає час розрахунку. З цією метою авторами роботи [12] результати аналітичної моделі були описані за допомогою регресійних залежностей, що дозволяє значно зменшити час розрахунку.

При розрахунку режимів редагування істотну роль відіграє облік якомога більшої кількості факторів. У роботі [13] вивчено вплив швидкості правлення, коефіцієнта зміцнення, модуля пружності, ширини листа на технологічні можливості редагування. Авторами отримані графіки, які показують граничні умови правки залежно від межі плинності, товщини листа, а також коефіцієнта пластичності, сили правки та потужності приводу.

Авторами роботи [14] за допомогою асоціативних моделей системи «ролик-смуга» було розраховано раціональні технологічні параметри правки листів на 23-роликовій прավильній машині. При цьому були враховані параметри роботи всіх механізмів прավильного агрегату, включно з натяжними станціями та намотувальними пристроями.

Аналіз літературних джерел показав, що при розробці технології правки листів раціонально використовувати аналітичні моделі. Але вплив низки факторів, у тому числі і від допоміжного обладнання, потребує використання скінчених елементів. У цьому результати скінчено-елементного моделювання доцільно представляти як регресійні описи чи іншого типу граничних умов. Автоматизація проектування технологічних налаштувань листопрավильного процесу дозволить знайти їх найбільш раціональні значення і тим самим підвищити якість продукції. Також розроблені системи можуть бути використані безпосередньо в системі управління листопрավильною машиною та підвищити його продуктивність за рахунок зниження часу на обробку листа, що робить актуальним тему даної роботи.

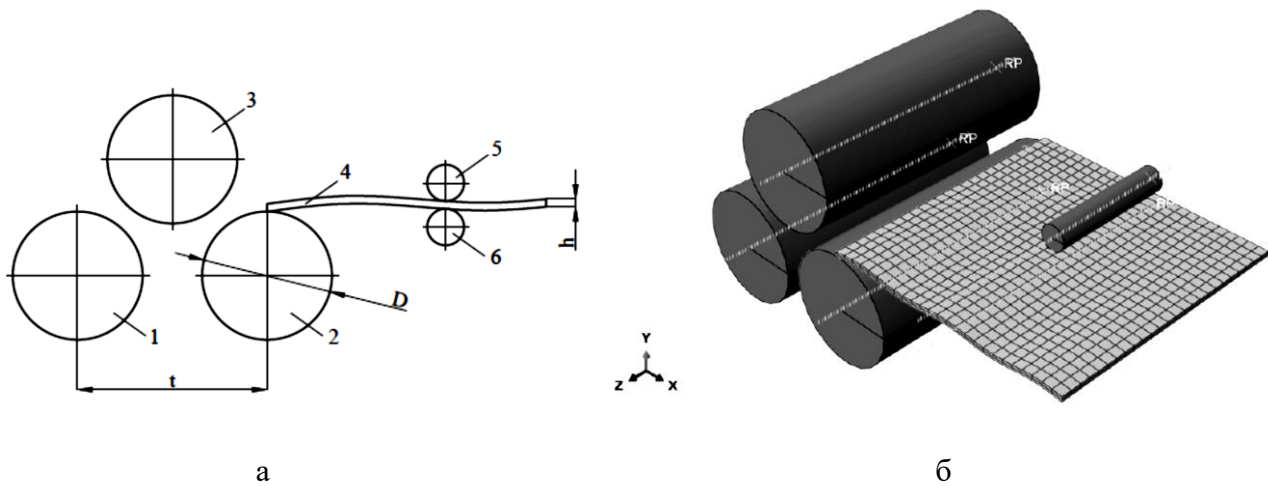
Розглянута стосовно до аналізу процесу правки листів на прավильних машинах розрахункова схема, яка являла собою лист 4, три робочих 1-3 і два 5, 6 напрямних ролика, представлена на рис. 1, а. Моделювання було зроблено методом скінчених елементів в системі DS Simulia Abaqus CAE.

При дослідженні використовувалася площина симетрії, що дозволило скоротити час розрахунків. Дослідженню підлягала правка ефекту повздовжньої хвилястості з визначенням сили правки на роликах.

З урахуванням викладеного вище було виконано дискретизацію об'єму (побудова скінчено-елементної сітки), котрий займає модель, на елементарні області (скінчені елементи) (див. рис. 1, б). Для моделювання роликів були використані тривимірні жорсткі елементи. Для

моделювання листа були використані елементи типу C3D8R – восьмивузлові лінійні, твердотільні скорочені елементи з контролем руйнування.

Вихідна скінчено-елементна модель має наступні граничні умови: нижні ролики машини 1 і 2, а також напрямні ролики 5 і 6 (див. рис. 1, а) мають один обертальний ступінь свободи, ролик 3 має два ступені свободи: можливість обертання навколо своєї осі, а також переміщення по осі «2» глобальної системи координат. У розрахунках використовувалася модель класичної пластичності металу, у якості матеріалу листа була прийнята сталь 08кп та сталь 45.



а

б

1-3 – робочі ролики; 4 – лист; 5, 6 – напрямні ролики

Рис. 1. Розрахункова (а) і скінчено-елементна в глобальній системі координат (б) модель процесу правки листів на листопрямильних машинах

Відповідно до розрахункової схеми (див. рис. 1, а) крок машини було прийнято 105 мм, діаметр усіх робочих роликів $D = 100$ мм. Безпосереднє моделювання процесу правки було виконано для листів, що було досліджено експериментально.

Контакт між листом і роликками задавався за допомогою моделі контакту «Поверхня до поверхні» шляхом завдання коефіцієнта тертя $\mu = 0,2$. Після цього усі 3 робочих ролика, а також два напрямних приводилися в обертання з кутовою швидкістю 0,95 і 4 рад/с відповідно, що, з урахуванням їх діаметра, відповідає лінійній швидкості руху листа уздовж осі «1» глобальної системи координат 0,1 м/с. Час кроку був прийнятий 6 с.

Для оцінки отриманих результатів вихідними в цьому випадку параметрами були обрані проекції реакцій у контрольних точках роликів (центри обертання) у глобальній системі координат, а також переміщення, деформації та напруження у вузлах скінчених елементів листа.

Основним цільовим призначенням експериментальних досліджень процесу холодного виправлення листів, проведених у лабораторних умовах, були оцінка ступеня достовірності відповідних математичних моделей та уточнення вихідних даних для їх чисельної реалізації.

Експериментальні дослідження напружено-деформованого стану металу, що виправляється, при реалізації процесу холодної правки були проведені шляхом фізичного моделювання даної технологічної схеми на спеціальній експериментальній установці для правки з 9-ма правильними роликками діаметром 100 мм, розміщеним з кроком 105 мм (рис. 2).

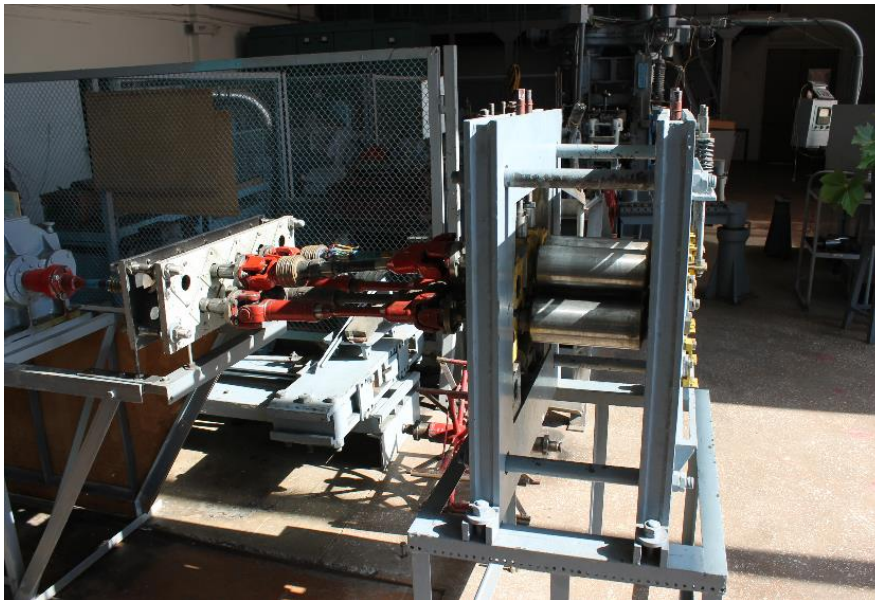


Рис. 2. Конструкція робочої кліти експериментальної установки для дослідження процесу правки відносно товстих листів

Кількісну оцінку емпіричних розподілів сил правки на кожному з правильних роликів проводили за допомогою месдоз з кільцевим пружним елементом, розміщених під натискними гвинтами кожного з правильного ролику, розраховані на сприйняття навантаження до 10000 Н (рис. 3). Тарування кільцевих месдоз здійснювали на розташованому у безпосередній близькості від установки спеціальному гідравлічному пресі шляхом їх попарного імітаційного навантаження силою відомої величини без розбирання комутаційного електричного ланцюга підключення датчиків до аналогово-цифрового перетворювача.

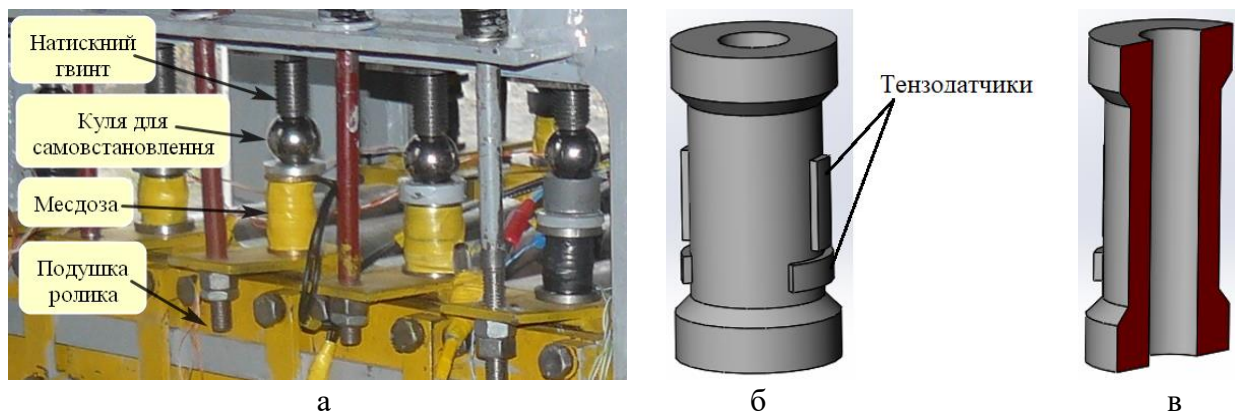


Рис. 3. Система (а) та конструкція силвимірювальних месдоз (б, в) під натискними гвинтами установки

Запис поточних значень зареєстрованих параметрів за силою випрямлення, а також їх подальше декодування здійснювали за допомогою комп'ютера з використанням аналого-цифрового перетворювача L-Card E140-44D та аналітичної інтерпретації відповідних калібрувальних графіків.

В експериментах досліджено холодне правлення листів зі сталі 08кп та 45 різної товщини. Геометричні параметри, що характеризують налаштування робочих роликів, представлені в табл. 1, а порівняння експериментальних та теоретичних значень сил правки – в табл. 2.

Таблиця 1

Налаштування робочих роликів експериментальної листопрямуючої машини 9×100×250

№ з/п	Товщина, мм	Ширина, мм	Марка сталі	Перекриття 3-го ролику, мм
1	2.5	150	45	2.5
2	3.5	105	08кп	1.3
3	9	100	08кп	3.0

Таблиця 2

Порівняння сил у теоретичних та експериментальних дослідженнях правки

№ з/п	Сила, <i>H</i>		Похибка, %
	Експериментальне значення	Теоретичне значення	
Стальний лист перерізом 2.5 × 152 мм			
1	6237	7173	15.0
2	7267,5	7173	1.3
3	7560	7173	5.1
4	7480	7173	4.1
Стальний лист перерізом 3.5 × 105 мм			
1	7134	5958	16.5
2	6622	5958	10.0
3	7129	5958	16.4
4	6115	5958	2.6
Стальний лист перерізом 9.0 × 100 мм			
1	27304	29075	6.5
2	27164	29075	7.0
3	27226	29075	6.8
4	27027	29075	7.6

Порівняння експериментальних даних процесів правки листів з результатами розрахунків свідчить про їх якісний та кількісний збіг. При цьому похибка розрахунку сили правки на третьому ролику не перевищувала 16,5%. Порівняння показує достатній ступінь надійності розроблених математичних моделей і можливість їх застосування на існуючому промисловому обладнанні.

ВИСНОВКИ

1. Аналіз існуючих математичних моделей та вимог до точності моделювання процесів правки листового металопрокату показав доцільність розробки скінченно-елементної моделі процесу з урахуванням особливостей механічного обладнання та сортаменту продукції.

2. Для перевірки адекватності розробленої математичної моделі біло проведено експериментальне дослідження правки листів товщиною 2,5; 3,5 та 9,0 мм на лабораторній правильній машині 9 × 100/105 × 250 ДДМА.

3. Порівняння експериментальних значень сил правки з теоретичними показало похибку розрахунку не більше 16,5 %, що свідчить о можливості застосування розробленої математичної моделі на діючому промисловому обладнанні.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Gribkov E.P., Kovalenko A.K., Hurkovskaya S.S. Research and simulation of the sheet leveling machine manufacturing capabilities. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. Vol. 120(1-2), pp. 743-759. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08806-z>
2. Hernández U. U. et al. Friction characterisation in levelling processes. *Advances in Materials and Processing Technologies*. 2016. Vol. 2, no. 4, pp. 503-513. DOI: <https://doi.org/10.1080/2374068X.2016.1247230>
3. Won C., Lee W., Lee H.-Y., Kang Y.-S., Yoon J. Evaluation of in-plane edge stretchability under severe contact condition for third-generation advanced high-strength steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. Vol. 108, pp. 1945-1958. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05537-x>
4. Fan Q.-H., Zhang H., Jiang X.-C., Tian B.-Z. Study on neutral layer offset of high-strength steel plate straightening of excavator's working arm. *Advances in Mechanical Engineering*. 2017. Vol. 9, no. 7. DOI: <https://doi.org/10.1177%2F1687814017712420>
5. J.-B. Lee and S.-S. Kang, "Numerical Modeling of Roller Leveler for Thick Plate Leveling. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2018. Vol. 19, no. 3, pp. 425-430. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12541-018-0051-x>
6. N. Mathieu, R. Dimitriou, A. Parrico, M. Potier-Ferry and H. Zahrouni. Flatness defects after bridle rolls: a numerical analysis of levelling. *International Journal of Material Forming*. 2011 Vol. 6, no. 2, pp. 255-266. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12289-011-1083-2>
7. A. V. Barabash, E. Yu. Gavril'chenko, E. P. Gribkov and O. E. Markov. Straightening of Sheet with Correction of Waviness. *Steel in Translation*. 2014. Vol. 44, no. 12, pp. 916-920,. DOI: <https://doi.org/10.3103/S096709121412002X>
- 8 B. Dratz, V. Nalewajk, J. Bikard and Y. Chastel. Testing and modelling the behaviour of steel sheets for roll levelling applications. *International Journal of Material Forming*. 2009. Vol. 2, pp. 519-522. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12289-009-0560-3>
9. S.-Y. Tsai and J.-Y. Chang. Design of deep learning on intelligent levelling system for industry 4.0 technology. *MATEC Web of Conferences*. 2018, Vol. 185, article no. 00026. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201818500026>
10. Z. Liu et al. Boundary determination of leveling capacity for plate roller leveler based on curvature integration method. *Journal of Central South University*. 2015. Vol. 22, pp. 4608-4615. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11771-015-3011-y>
11. Z. Liu et al. An analytical study of optimal roller intermeshes for the plate leveling process. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: *Journal of Engineering Manufacture*. 2021. Vol. 235, no. 1-2, pp. 278-289. DOI: <https://doi.org/10.1177%2F0954405420947959>
12. L. Cui, X. Hu and X. Liu. Research on Mathematical Model of Leveling Process for Plate Mill. *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 148-149, pp. 368-371. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.148-149.368>
13. Y. Wang, Z. Liu and X. Yan. Evaluation of straightening capacity of plate roll straightener. *Journal of Central South University*. 2012. Vol. 19, no. 9, pp. 2477-2481. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11771-012-1299-4>
14. Yi Guodong, Zili Wang and Zhouyu Hu, "A novel modeling method in metal strip leveling based on a roll-strip unit. *Mathematical Problems in Engineering*. 2020. Vol. 2020, Article ID 1486864,. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/1486864>

Gribkov E., Dobronosov Yu., Kovalenko A. Experimental study of the rolled metal straightening on multi-roll leveler.

Straightening of rolled sheets plays an important role in shaping the quality characteristics of the finished product. Modern metallurgical plants use multi-roller sheet straightening machines with individual roller settings. These machines have a flexible system of technological settings, which requires a mathematical model of the plate levelling to solve computer-aided design problems. Moreover, if for steels for general engineering purposes the rational value of the position of the rollers is in a wide range, then for high-strength steels this is a very narrow field, requiring a very accurate result from the mathematical model. The most accurate models are those based on the finite element method. In this work, a finite element model of the plate straightening process in a multi-roller machine was developed. To verify the adequacy of the developed model, experimental studies were carried out in laboratory conditions. The laboratory setup was a 9-roller sheet straightening machine with a roller diameter of 100 mm, located at 105 mm pitches. The rollers were adjusted using a screw mechanism. The study was carried out for a 5-roller version of the machine. All rollers were driven. Experiments were carried out for sheets of three thicknesses: 2.5, 3.5 and 9.0 mm. The width of the sheet for a thickness of 2.5 mm was about 150 mm, for the rest - 100 mm. 4 sheets of each thickness were used. The straightening force was measured using ring gauges installed between the pressure screw and the roller pad. An ADC was used to process the signal. Comparison of experimental data on plate straightening processes with calculation results indicates their qualitative and quantitative agreement. At the same time, the error in calculating the straightening force on the third roller did not exceed 16.5 %. The comparison shows a sufficient degree of reliability of the developed mathematical models and the possibility of their application on existing industrial equipment.

Keywords: plate, straightening, leveling machine, mathematical model, finite element model, experimental studies, force measurement.

Грибков Едуард Петрович – д-р техн. наук, проф. ДДМА
Gribkov Eduard – Doctor of Technical Sciences, Full Professor DSEA
E-mail: kit@digma.donetsk.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1565-6294>

Доброносів Юрій Костянтинович – доц. МІП
Dobronosov Yuriy – Associate professor, Associate professor of Department MIP
E-mail: Yuriy.Dobronosov@mipolytech.education
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9608-3386>

Коваленко Андрій Костянтинович – асистент ДДМА
Kovalenko Andrii – Assistant DSEA
E-mail: kit@digma.donetsk.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3379-2000>

Донбаська державна машинобудівна академія (ДДМА), м. Краматорськ
Donbas State Engineering Academy (DSEA), Kramatorsk

ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка» (МІП), м. Запоріжжя
LLC Technical University "Metinvest Polytechnic" (MIP), Zaporizhzhia

Стаття надійшла до редакції 09.08.23 р.