

Пожидаєв А. В.
Грибков Е. П.
Бережна О. В.

МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПІД ЧАС ПРАВКИ ЛИСТІВ НА ЛИСТОПРАВИЛЬНИХ МАШИНАХ З НАТЯЖІННЯМ

Розвиток металургійної продукції іде шляхом створення все більш міцних марок сталей, що в свою чергу вимагає розробки нових технологій та обладнання з обробки металопрокату. Правка знакозмінним вигином з натяжінням особливо актуальна для тонкого листового металопрокату де правка на традиційних багатороликових машинах не дає бажаного результату з точки зору постійно зростаючих вимог до якості продукції з боку споживачів. Для вирішення цього питання існують різні способи для визначення параметрів процесу правки, як то моделювання аналітичними методами або скінченно-елементними моделюваннями, які мають свої недоліки та переваги. Огляд існуючих моделей правки листового прокату виявив що вплив розтяжіння в них не враховується, тому визначення впливу величини натяжіння при правці на листоправильній машині на напружено-деформований стан виправленого листового металу є актуальним. Метою роботи є дослідження напружено-деформованого стану листового металу при правці знакозмінним вигином з натяжінням. Дослідження цього процесу було виконано шляхом використання програмного продукту скінченно-елементного моделювання у середовищі Abaqus CAE. В роботі надано розрахункову схему та основні положення скінченно-елементної моделі процесу виправлення листів з натяжінням. Проаналізовано вплив ступеня натяжіння листа на величину напружено-деформованого стану листа. У процесі аналізу отриманих результатів було порівняно еквівалентні деформації за перерізом при правці листів у роликотправильній машині без натяжіння та з різними ступенями натяжіння. Встановлено, що збільшення натяжіння збільшує ступінь деформації на третьому ролику, причому характер впливу має нелінійний характер. Запропонована скінченно-елементна модель може бути використана для визначення оптимальних налаштувань робочих роликів правильної машини. Підсумком роботи є отримання залежності деформації листа від натяжіння при правці листового металу.

Ключові слова: листоправильна машина, правка листів, ступінь натяжіння, скінченно-елементна модель, робочі ролики, напружено-деформований стан.

Правка листів є важливим етапом обробки для отримання якісної металопродукції в умовах сучасних металургійних підприємств. Підвищення вимог споживачів металу до геометричних характеристик загалом та до планшетності зокрема робить актуальним розвиток листоправильних машин здатних впоратись з такими дефектами форми листового металу як коробуватість, хвилястість, серпоподібність або коробуватість та хвилястість одночасно. Зазначене з точки зору підвищення ефективності процесу та розширення можливостей для реалізації правки можливе при використанні правки листів з натяжінням [1]. Також актуальним є розвиток математичних моделей процесу правки для визначення напружено-деформованого стану листового металу та необхідних налаштувань листоправильної машини. 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. У якості методів моделювання використовуються чисельні та скінченно-елементні моделі. Чисельні моделі мають високу швидкодію, що дозволяє їх використовувати в процесах оптимізації та 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.

Серед чисельних моделей найбільшого поширення набули різного роду рішення рівняння пружної лінії при поданні металу, що виправляється, у вигляді статично невизначеної багатоопорної балки. Прикладом використання такого підходу є модель [2] заснована на рішенні пружної лінії методом кінцевих різниць, що дозволило отримати тривимірне уявлення про розподіл деформацій, що мають різний рівень ширини смуги.

Також слід зазначити чисельну модель процесу правки, відмінною особливістю якої є облік таких факторів, як безперервність епюри кутів повороту на межах розрахункових ділянок листа, зміщення точки контакту від вершини ролика по горизонталі та вертикалі, вплив залишкових напруг, можливість переходу зосередженого контакту в розподілений та облік напруги металу при виправленні [3–5]. Дані моделі ПАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» були успішно впроваджені на ряді листопрямильних машин товстолистових станів.

Для порівняння різних методів моделювання в роботі [6] розроблено одновимірну чисельну та двовимірну скінченно-елементні моделі, які підтверджені експериментально. Показано достатню збіжність результатів для сили виправлення та деформацій, у той час як моменти визначені з високою похибкою, незважаючи на більш точний опис механічних властивостей матеріалу в скінченно-елементній моделі.

У роботі [7] розглянуто скінченно-елементну модель виправлення алюмінієвих смуг які тягнуть у роликах. Показано, що дефект хвилястості можна усунути шляхом профілювання роликів для подовження коротких позовжніх волокон.

Петрушка Я. (J. Petrushka) [8] на основі методу скінченних елементів у програмній оболонці MatLab запропонував двовимірну математичну модель для визначення кривизни листів та вибору раціональних налаштувань правильної машини. Даний підхід поєднує точність методу скінченних елементів та швидкодню чисельного моделювання, але потребує досить складного опису моделі.

У всіх роботах, присвячених моделюванню правки листів, відзначається переважний вплив властивостей матеріалу на перебіг процесу. У роботах [9-10] показано важливість обліку як механічних властивостей матеріалу, так і прояву ефекту Баушингера.

Існуючі моделі процесу правки листового прокату не враховують впливу розтягу листового металу на розподіл деформації листа і, як наслідок, виправлення дефектів форми листів. Це робить актуальним подальший розвиток математичних моделей з поданням деформованого металу в тривимірному просторі і подальшим аналізом впливу технологічних налаштувань робочих роликів та ступеня натягіння на кінцеву площинність прокату.

Метою даної роботи є визначення впливу величини натягіння при правці на листопрямильній машини на напружено-деформований стан виправленого листового металу.

Для досягнення зазначеної мети було поставлено та вирішено такі завдання:

- створення процесу правки листового прокату на основі використання моделі скінченно-елементного моделювання у середовищі Abaqus CAE;
- на основі реалізації розробленої скінченно-елементної моделі встановлення впливу технологічних налаштувань роликів та ступінь натягіння на напружено-деформований стан металу.

В рамках аналізу напружено-деформованого стану металу при правці листів було виконано розрахунок 7-роlikової листопрямильної машини з використанням методу скінченних елементів у САЕ-системі Dassault SIMULIA Abaqus CAE.

Розглянута стосовно аналізу процесу правки листів на правильних машинах розрахункова схема, яка являє собою лист 1, сім робочих роликів 2 та сила натягіння 3, представлена на рисунку 1.

Для моделювання роликів були використані тривимірні елементи, що не деформуються. Для моделювання листа були використані елементи типу C3D8R – восьмивузлові лінійні, твердотілі редуковані елементи з контролем руйнування.

Відповідно до розрахункової схеми (див. рис. 1) крок машини t був прийнятий 110 мм, діаметр робочих роликів рівним 100 мм, перекриття роликів $W = 3,3$ мм, швидкість правки $V = 0,5$ м/с. Безпосередньо моделювання процесу правки було виконано для листа товщиною 5 мм з диференційованою силою натягіння $S = 0,0 \dots 0,4$. (з кроком 0,2).

Вихідна скінченно-елементна модель має такі граничні умови: нижні та перший, третій верхні ролики машини, мають один обертальний ступінь свободи, другий верхній має два ступені свободи, можливість обертання навколо своєї осі, і переміщення осі «2» глобальної системи координат.

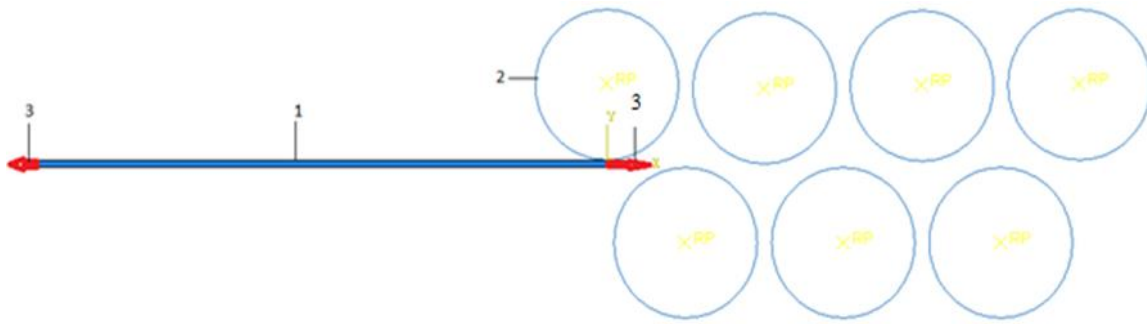


Рис. 1. Базова модель правки листа з натяжінням:
1 – лист; 2 – ролики; 3 – сила натяжіння

У розрахунку використовувалася модель класичної пластичності металу, в якості матеріалу листа була прийнята сталь 08кп. Контакт між листом і роликami ставився за допомогою моделі контакту «Поверхня до поверхні» шляхом завдання коефіцієнта тертя рівним 0,1. Всі робочі ролики приводилися у обертання з кутовою швидкістю 10 рад/сек відповідно, що, з урахуванням їх діаметра, відповідає приблизній швидкості руху листа вздовж осі «1» глобальної системи координат, що дорівнює 0,5 м/с.

Для оцінки отриманих результатів в даному випадку параметрами були обрані проекції реакцій у контрольних точках роликів у глобальній системі координат, а також, еквівалентні деформації та напруження у вузлах скінченних елементів листа.

Розрахунки були зроблені для різного ступеня натяжіння. На рис. 2 представлені поля розподілу еквівалентних деформацій за перерізом листа при різних ступенях натяжіння.

Моделювання проводилось у 3 етапи зі ступенями натяжіння $S = 0.0$; $S = 0.2$; та $S = 0.4$.

З аналізу представлених результатів видно, що при правці без натяжіння та з натяжінням $S = 0.2$ рівень еквівалентної деформації PEEQ практично не змінюється PEEQ дорівнює 0.081 та 0.084 відповідно. Тобто маємо збільшення на 3,7%. Але якщо порівняти величину еквівалентної деформації при ступенях натяжіння $S = 0.2$ та $S = 0.4$ маємо збільшення величини PEEQ з 0,084 до 0,127, тобто на 51%.

З приводу цього впливає висновок що збільшення величини натяжіння S величина еквівалентної деформації PEEQ зростає непропорційно.

ВИСНОВКИ

Розроблена скінченно-елементна модель процесу правки листів з натяжінням дозволяє визначити характер впливу величини натяжіння на напружено-деформований стан готового прокату. Представлені результати розрахунку для листів товщиною 5 мм із сталі 08кп.

Показано, що при натяжінні $S = 0,2$ величина еквівалентної деформації PEEQ дорівнює 0.084 і збільшується лише на 3,7% у порівнянні з правкою без натяжіння. Але при збільшенні натяжіння до $S = 0,4$ ступінь еквівалентної деформації зростає до 0,127, тобто збільшується на 51% у порівнянні з натяжінням $S = 0.2$.

Дані результати дають розуміння про ефективний ступінь натяжіння при розробці технології правки листів на багатороликових машинах з натяжінням.

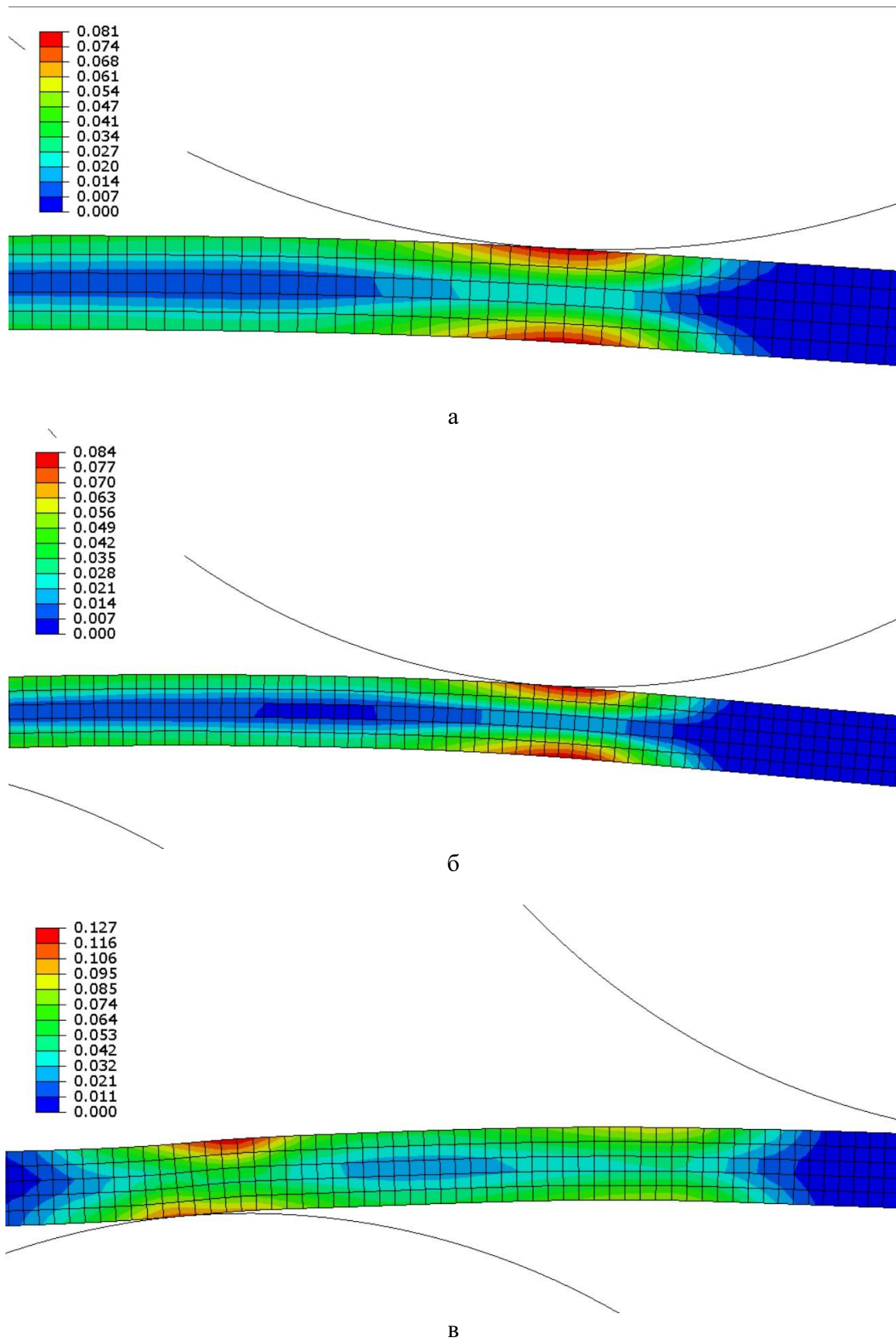


Рис. 2. Поля розподілу еквівалентних деформацій PEEQ по перерізу листів при різних ступенях натягіння S :

а – $S = 0.0$, PEEQ = 0.081; б – $S = 0.2$, PEEQ = 0.084; в – $S = 0.4$, PEEQ = 0.127

Перспективи подальшого розвитку в даному напрямку є дослідження процесу правки з варіюванням кількості та діаметру роликів, їх перекриттям в залежності від ступеня натягнення. А також проведення експериментальних досліджень для перевірки ступеня достовірності для підтвердження теоретичних.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Тітаренко О.І. Удосконалення технологічних режимів та конструктивних параметрів обладнання агрегатів для протяжної термо-деформаційної обробки тонких холоднокатаних стрічок з кольорових металів та сплавів: автореф. дис. ... канд. техн. наук.: 05.03.05; 05.04.04. Краматорськ. 1993. 16 с.
2. Zhifang L., Yongqin W., Xingchun Y. A new model for the plate leveling process based on curvature integration method. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2012. 54 (1), pp. 213–224. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2011.10.011>.
3. 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. 120(1-2), pp. 743-759. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08806-z>.
4. Грибков Е.П., Доброносів Ю.К., Коваленко А.К. Експериментальне дослідження процесу правки прокату на багатороликівих правильних машинах. *Обробка матеріалів тиском. Materials Working by Pressure*. 2023. 1(52), С. 138-144. [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2023-1\(52\)138](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2023-1(52)138).
5. Грибков Е.П., Гаврильченко Є.Ю., Доброносів Ю. К. Удосконалення процесу правки гарячекатаних листів і листопрямильних машин для його реалізації: монографія. Одеса : Олді+. 2023. 184 с. ISBN 978-966-289-602-2.
6. Silvestre E., Eneko S., Lander G., Joseba M. Testing and Modeling of Roll Levelling Process. *Key Engineering Materials*. 2014. 611–612, pp. 1753–1762. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.611-612.1753>.
7. Mathieu N., Dimitriou R., Parrico A., Potier-Ferry M., Zahrouni H. Flatness defects after bridle rolls: a numerical analysis of leveling. *International Journal of Material Forming*. 2013. 6 (2), pp. 255-266. <http://dx.doi.org/10.1007/s12289-011-1083-2>.
8. Petruška J., Návrát T., Šebek F. A New Model for Fast Analysis of Leveling Process. *Advanced Materials Research*. 2012. 586, pp. 389–393. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.586.389>.
9. Lemoine X., Aouafi A. Bauschinger effect correspondence of experimental tests. *International Journal of Material Forming*. 2008. 1, pp. 241-244. <http://dx.doi.org/10.1007/s12289-008-0357-9>.
10. Dratz B., Nalewajk V., Bikard J., Chastel Y. Testing and modelling the behaviour of steel sheets for roll levelling applications. *International Journal of Material Forming*. 2009. 2 (1). pp. 519–522. <https://doi.org/10.1007/s12289-009-0560-3>.

REFERENCES

1. Titarenko O.I. Improvement of technological modes and design parameters of equipment for drawing thermo-deformation processing of thin cold-rolled strips made of non-ferrous metals and alloys: Abstract of Ph.D. Dissertation: 05.03.05; 05.04.04. Kramatorsk. 1993. 16 p. (in Ukrainian).
2. Zhifang L., Yongqin W., Xingchun Y. A new model for the plate leveling process based on curvature integration method. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2012. 54 (1), pp. 213–224. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2011.10.011>.
3. 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. 120(1-2), pp. 743-759. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08806-z>.
4. Gribkov E.P., Dobronosov Yu.K., Kovalenko A.K. Experimental study of the rolled metal straightening on multi-roll leveler. *Materials Working by Pressure*. 2023. 1(52), pp. 138-144. [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2023-1\(52\)138](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2023-1(52)138). (in Ukrainian).
5. Gribkov E.P., Gavrilenko E.Yu., Dobronosov Yu. K. Improvement of the process of straightening hot-rolled sheets and straightening machines for its implementation: monograph. Odessa : Oldi+. 2023. 184 p. ISBN 978-966-289-602-2. (in Ukrainian).
6. Silvestre E., Eneko S., Lander G., Joseba M. Testing and Modeling of Roll Levelling Process. *Key Engineering Materials*. 2014. 611–612, pp. 1753–1762. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.611-612.1753>.
7. Mathieu N., Dimitriou R., Parrico A., Potier-Ferry M., Zahrouni H. Flatness defects after bridle rolls: a numerical analysis of leveling. *International Journal of Material Forming*. 2013. 6 (2), pp. 255-266. <http://dx.doi.org/10.1007/s12289-011-1083-2>.
8. Petruška J., Návrát T., Šebek F. A New Model for Fast Analysis of Leveling Process. *Advanced Materials Research*. 2012. 586, pp. 389–393. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.586.389>.
9. Lemoine X., Aouafi A. Bauschinger effect correspondence of experimental tests. *International Journal of Material Forming*. 2008. 1, pp. 241-244. <http://dx.doi.org/10.1007/s12289-008-0357-9>.

10. Dratz B., Nalewajk V., Bikard J., Chastel Y. Testing and modelling the behaviour of steel sheets for roll levelling applications. *International Journal of Material Forming*. 2009. 2 (1), pp. 519–522. <https://doi.org/10.1007/s12289-009-0560-3>.

Pozhidaev A., Gribkov E., Berezshna O. Modelling of the stress-strain state during levelling sheets on sheet straightening machines with tension

The development of metallurgical products is moving towards the creation of increasingly stronger grades of steel, which in turn requires the development of new processing technologies and equipment for metal rolling. Tension levelling through alternating bending is particularly relevant for thin sheet metal, where conventional multi-roll machines do not achieve the desired results to meet the continuously increasing quality demands of consumers. To address this issue, various approaches exist, such as numerical and finite element modeling methods, each with their own advantages and limitations. A review of existing sheet levelling models has shown that the effect of stretching is not accounted for in them. Therefore, this study investigates the effect of tension magnitude during levelling on a levelling machine and its impact on the stress-strain state of the levelled sheet metal. The aim of this work is to study the stress-strain state of sheet metal during tension levelling with alternating bending. The research on tension levelling with alternating bending was conducted using finite element modeling software in the Abaqus CAE environment. A finite element model of the sheet levelling process with tension was proposed. The effect of sheet tension level on the stress-strain state of the sheet was analyzed. During experimental modeling, equivalent strains across the sheet section were compared during levelling in a roll levelling machine, both without tension and under varying degrees of tension. It was found that increased tension raises the strain level on the third roll. The proposed finite element model can be used to determine the optimal settings for the working rolls of the levelling machine. The study concludes with an obtained relationship between sheet deformation and tension during sheet metal levelling.

Key words: sheet, straightening machine, sheet straightening, step tension, finite element model, working rollers, stressed and deformed state.

Пожидаєв Андрій Вікторович – аспірант, ДДМА

Pozhydaiev Andrii – Graduate student DSEA

E-mail: andreypozhydaiev1978@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2323-4914>

Грибков Едуард Петрович – д-р техн. наук, професор МІП

Gribkov Eduard – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, MIP

E-mail: eduard.gribkov@mipolytech.education

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1565-6294>

Бережна Олена Валеріївна – д-р техн. наук, доцент, ДДМА

Berezshna Olena – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, DSEA

E-mail: elena.kassova07@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6205-1987>

ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ-Тернопіль.

DSEA – Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk-Ternopil.

МІП – ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка», м. Запоріжжя.

MIP – Technical University “Metinvest Polytechnic” LLC, Zaporizhzhia

Стаття надійшла до редакції 10.09.24 р.