

**Селезньов М.Є.**

Державний університет економіки і технологій

**Боровік П.В.**

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля

## АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ РОЗДІЛОВОГО ПРОЦЕСУ НА МЕТАЛОЄМНІСТЬ НОЖИЦЬ З ШЕВРОННИМ НОЖЕМ

У статті, на підставі результатів проведеного математичного моделювання, представлено аналіз впливу основних технологічних параметрів процесу поперечного розрізання плоского металопрокату на металоємність проєктованих ножиць з шевронним ножем. Зокрема, показаний вплив максимальної товщини, ширини та межі міцності розрізаного плоского металопрокату, а також кута нахилу прямолінійних площин різальної кромки застосовуваного шевронного ножа, шляхом математичного моделювання процесу розрізання з варіюванням зазначених технологічних параметрів в діапазонах, що є актуальними при розробленні нових та вдосконаленні існуючих ножиць з шевронним ножем. За результатами проведеного математичного моделювання отримані залежності маси проєктованих ножиць з шевронним ножем від основних технологічних параметрів розділової операції та дана оцінка впливу кожного з них. При цьому, в модельованих діапазонах варіювання технологічних параметрів розглянутої розділової операції, найбільш інтенсивний вплив на металоємність ножиць має ширина розрізаного плоского металопрокату, що є очікуваним, оскільки вона безпосередньо зумовлює ширину металоконструкції проєктованих ножиць з шевронним ножем. Крім того встановлено, що кут нахилу прямолінійних площин різальної кромки шевронного ножа також має суттєвий вплив на металоємність ножиць, при цьому залежність маси ножиць від цього технологічного параметру, в модельованому діапазоні, має зворотній нелінійний характер з явною зміною інтенсивності. Таким чином, при висуненні та впровадженні пропозицій щодо виготовлення, ножиць для розрізання плоского металопрокату шевронним ножем, потрібна комплексна оцінка впливу основних технологічних параметрів розділового процесу як на металоємність проєктованих ножиць, так і на якість готової продукції. Результати виконаного дослідження можуть бути в подальшому використані при розробці, тестуванні та впровадженні програмного забезпечення для автоматизованого проєктування технології та обладнання процесу поперечного розрізання плоского металопрокату на ножицях з шевронним ножем.

**Ключові слова:** ножиці, розрізання, плоский металопрокат, технологічні параметри, металоємність, математичне моделювання.

**Постановка проблеми.** Доля плоского металопрокату займає відносно велику частку в загальному обсязі продукції металургійних виробництв, що зумовлено зростаючим попитом у різних галузях промисловості. В умовах сучасних ринкових викликів, таких як енергетична ефективність, екологічні стандарти та автоматизація виробництва, металургійні підприємства змушені не лише збільшувати обсяги випуску, а й модернізувати обладнання. Це вимагає впровадження новітніх, більш ефективних машин і механізмів, здатних забезпечити високу продуктивність та якість кінцевої продукції.

Велику частину плоского металопрокату становлять листи та штаби товщиною від 5 до 80 мм і шириною від 600 до 4800 мм. Виготовлення такої продукції передбачає виконання розділових операцій на різних етапах технологічного процесу – як під час прокатки, так і на завершальних стадіях формування готової металопродукції. Враховуючи сучасні вимоги до точності геометричних параметрів і механічних властивостей, якість цих операцій безпосередньо впливає на конкурентоспроможність виробів та їх відповідність міжнародним стандартам.

Ефективне розрізання на мірні довжини плоского металопрокату найчастіше здійснюється за

допомогою ножиць, різних типів які забезпечують високопродуктивне розділення матеріалу методом зсуву та гарантують при цьому необхідну якість готової продукції. [1-3]. Варто відзначити, що цей метод розділення металу є більш ефективним в порівнянні зі способами механічного різання, які супроводжуються частковим видаленням матеріалу із зони розділення, або термічними методами, які супроводжуються обов'язковим локальним нагріванням металу в зонах наближених до місця розділення [4, 5]. Реалізація розділення методом зсуву (розрізання) дає змогу виготовляти плоский металопрокат необхідної форми та розмірів із мінімальними втратами матеріалу, виключаючи зміну механічних властивостей, яка може виникати при термічних методах розділення [5]. При цьому для реалізації процесу поперечного розділення плоского металопрокату широко застосовуються ножиці з похилим (гільйотинним) та двосхилим (шеvronним) ножем [6-8]. Такі ножиці дозволяють розрізати плоский металопрокат товщиною понад 30 мм та шириною понад 2300 мм з високою точністю та продуктивністю [7].

Слід зазначити, що для поперечного розрізання плоского металопрокату можуть застосовуватися й ножиці з дуговою формою ножа, коли дуговий ніж перекочується по відношенню до нижнього ножа, що дозволяє локалізувати зону розрізання та мінімізувати дефекти розділених частин. Такі ножиці дозволяють ефективно виконувати поперечне розділення плоского металопрокату, проте мають більш складну кінематику, та, відповідно, більшу металоемність у порівнянні з ножицями з гільйотинним чи шевронним ножами. Тому саме ножиці з похилими ножами представляються більш перспективними, та становлять значну частину номенклатури обладнання, яке виробляється для оснащення ліній розрізання сучасних прокатних станів, що спеціалізуються на виготовленні плоского металопрокату.

В умовах сучасного машинобудівного виробництва, ще на етапі попередньої обробки потенційного замовлення на поставку (виготовлення) ножиць для поперечного розрізання плоского металопрокату похилим ножем, фахівцю досить часто необхідно попередньо визначити собівартість проєктованих ножиць, яка значною мірою залежить від їх металоемності та технологічних умов реалізації процесу розділення. Ця задача потребує врахування широкого спектру факторів, які мають вплив як на енергосилові параметри розділової операції, так і на якість готової металопродукції [2, 8, 9]. При цьому адекватна оцінка собівартості проєктованих ножиць може бути виконана з використанням сучасних засобів математичного моделювання, розвиток яких потребує глибокого розуміння характеру впливу параметрів процесу розрізання плоского металопрокату на металоемність проєктованих ножиць.

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В роботі [7], на базі відомих даних про металоемність існуючих ножиць та їх технологічні характеристики, була розроблена математична модель, яка дозволяє визначати металоемність проєктованих ножиць, з урахуванням максимальної сили розрізання та максимальної ширини розрізуваного плоского металопрокату. Однак наявні результати не дозволяють сформулювати глибокого обґрунтованого уявлення про характер впливу основних технологічних параметрів процесу розрізання плоского металопрокату на металоемність проєктованих ножиць. Тому, з точки зору створення нових ножиць для поперечного різання плоского металопрокату з похилим ножем та можливими унікальними характеристиками, представляється доцільним виконати математичне моделювання даної розділової операції в деякому можливому діапазоні варіювання основних технологічних параметрів, з метою виявлення оптимальних умов її реалізації, та з урахуванням показників якості готової металопродукції, що і було покладено в основу при формуванні мети даної роботи.

**Постановка завдання.** Метою статті є аналіз впливу основних технологічних параметрів розділової операції на металоемність проєктованих ножиць з двосхилим (шеvronним) ножем, використовуваних для поперечного розрізання плоского металопрокату, на базі математичної моделі, яка дозволяє визначати металоемність проєктованих ножиць.

**Виклад основного матеріалу.** Для досягнення зазначеної мети, в рамках даної роботи, була виконана чисельна реалізація математичної моделі залежності металоемності ножиць з похилим ножем від сили розрізання та максимальної ширини розрізуваного плоского металопрокату, яка має наступний вигляд [7, с. 141]:

$$M = B (0,39 + 0,04 N^{0,49} \ln(N)),$$

де  $B$  – максимально допустима ширина розрізуваного плоского металопрокату, мм;

$N$  – максимально допустима сила розрізання, кН.

Чисельна реалізація зазначеної математичної моделі виконувалася з варіюванням основних технологічних параметрів розділової операції у діапазонах, які є актуальними при проєктуванні сучасних ножиць для поперечного розрізання плоского металопрокату похилим ножем. При цьому розрахунок величини максимальної сили розрізання виконувався для класичного шевронного ножа, за методикою, представленою в роботі [8]. При моделюванні, розрахунок металоемності ножиць виконувався в залежності від наступних основних параметрів процесу поперечного розрізання: товщина (10...25 мм), ширина (1500...2500 мм) та межа міцності (300...800 МПа) розрізуваного плоского металопрокату. Також варіювався кут

нахилу прямолінійних площин шевронного ножа в межах  $1,2^\circ \dots 3^\circ$

На рис. 1 представлені отримані залежності маси  $M$  проєктованих ножиць від максимальної товщини  $h$  розрізуваного плоского металопрокату. Дані залежності отримані для випадків розрізання плоского металопрокату товщиною 10...25 мм та шириною 2000 мм з трьох умовних марок сталі (з межею міцності 300 МПа, 500 МПа та 800 МПа) шевронним ножом з кутом нахилу прямолінійних площин  $3^\circ$ .

Представлені залежності мають виражений прямий лінійний характер, що є досить очікуваним, враховуючи, що максимальна товщина розрізуваного плоского металопрокату є одним з визначальних факторів, які впливають на енергосилові параметри реалізації розділової операції і, як наслідок, металоємність необхідних ножиць для поперечного розрізання плоского металопрокату. При цьому, середній приріст маси необхідних ножиць на кожні додаткові 10% від початкової максимальної товщини плоского металопрокату, в модельованих умовах, становить 991 кг, 1402 кг та 1910 кг для трьох прийнятих умовних марок сталі, відповідно.

Також виконувалось математичне моделювання процесу поперечного розрізання шевронним ножом плоского металопрокату з варіюванням його максимальної ширини в діапазоні 1500...2500 мм. На рис. 2 представлені отримані залежності маси  $M$  проєктованих ножиць від максимальної ширини  $B$  розрізуваного плоского металопрокату. Представлені залежності отримані при моделюванні процесу розрізання плоского металопрокату товщиною 25 мм, як і у попередньому випадку, з трьох умовних марок сталі (з межею міцності 300 МПа, 500 МПа та 800 МПа), шевронним ножом з кутом нахилу прямолінійних площин  $3^\circ$ .

Дані залежності також є прямими та наближеними до лінійних, це може пояснюватися тим, що ножиці для поперечного розрізання плоского металопрокату з шевронним ножом часто мають досить типову конструкцію, яка при проєктуванні може бути пропорційно масштабована для забезпечення розрізання більшої максимальної ширини плоского металопрокату. В даному випадку, середній приріст маси необхідних ножиць на кожні додаткові 10% від початкової максимальної ширини плоского металопрокату, в модельованих умовах, для зазначених умовних марок сталі, становить, в середньому, 1920 кг, 2697 кг та 3657 кг, відповідно.

Враховуючи характер отриманих залежностей, попередньо можна стверджувати, що при необхідності збільшення максимальної товщини, або ширини розрізуваного плоского металопрокату металоємність проєктованих ножиць може бути, за необхідності, пропорційно збільшена, або зменшена відносно початкової.

На наступному етапі виконувалось математичне моделювання досліджуваної розділової операції для випадків використання шевронних ножів з кутом  $\alpha$  нахилу прямолінійних площин  $1,2^\circ$ ,  $2^\circ$  та  $3^\circ$  з варіюванням значень межі міцності розрізуваного матеріалу, яка також, має суттєвий вплив на енергосилові показники розділової операції і, як наслідок, металоємність проєктованих ножиць. На рис. 3 представлені, отримані за результатами моделювання, залежності металоємності проєктованих ножиць від межі міцності розрізуваного матеріалу. Ці залежності отримані при моделюванні процесу розрізання плоского металопрокату товщиною 25 мм та шириною 2000 мм шевронними ножами з кутом нахилу прямолінійних площин  $1,2^\circ$ ,  $2^\circ$  та  $3^\circ$ .

Представлені залежності також прямі та наближені до лінійних, при цьому, очікувано,

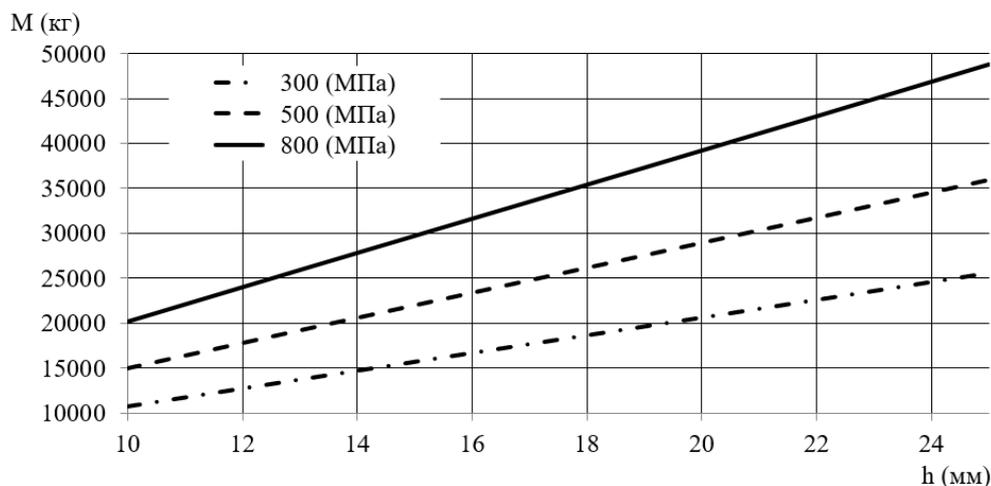


Рис. 1. Залежності маси  $M$  проєктованих ножиць від максимальної товщини  $h$  розрізуваного плоского металопрокату, отримані для трьох умовних марок сталі (з межею міцності 300 МПа, 500 МПа та 800 МПа)

варіювання межі міцності розрізуваного металопрокату в діапазоні 300...800 МПа, призводить до приросту маси необхідних ножиць, який, для кожного модельованого значення кута  $\alpha$ , становить, відповідно, в середньому, 2497 кг, 1689 кг та 1389 кг, на кожні додаткові 10% від початкової максимальної межі міцності розрізуваного плоского металопрокату.

В той же час слід відзначити наявну неоднорідність приросту показників металоємності ножиць при зменшенні кута нахилу прямолінійних площин шевронного ножа. Зокрема у проміжку між  $1^\circ$  та  $2^\circ$  спостерігається більш суттєве зростання металоємності ножиць ніж у проміжку між  $2^\circ$  та  $3^\circ$ , що може бути корисним враховувати як при проектуванні нових ножиць, так і при коригуванні

наявних техніко комерційних пропозицій. Тому на останньому етапі дослідження було виконане моделювання процесу розрізання плоского металопрокату товщиною 25 мм та шириною 2000 мм з трьох зазначених умовних марок сталі з варіюванням кута нахилу прямолінійних площин шевронного ножа в межах  $1,2^\circ \dots 3^\circ$ . Отримані, при моделюванні залежності представлені на рис. 4.

Представлені на рисунку 4 залежності мають зворотний нелінійний характер. При цьому зі зменшенням значення кута  $\alpha$  у заданому діапазоні, збільшення металоємності ножиць відбувається з різною інтенсивністю, з явним переходом при значенні кута  $2,1^\circ \dots 2,2^\circ$ , що доцільно враховувати при визначенні оптимальних параметрів процесу поперечного розрізання плоского мета-

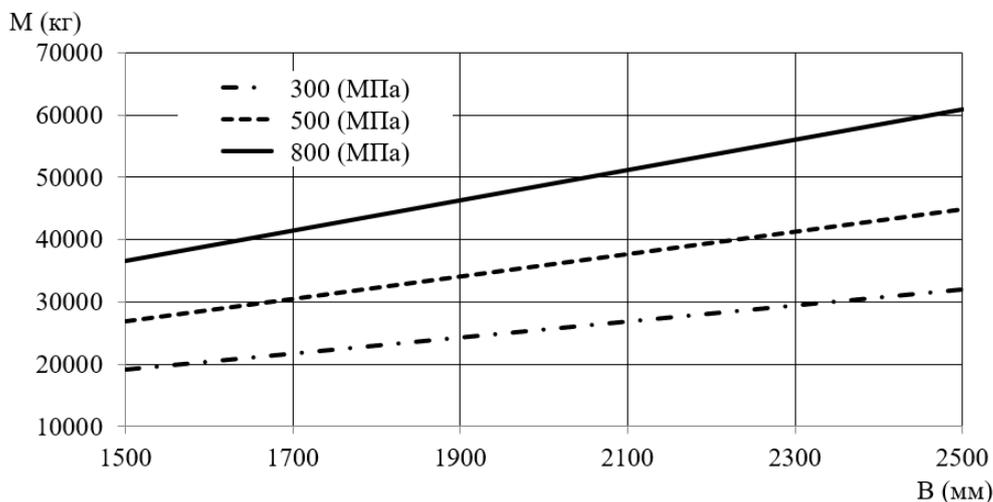


Рис. 2. Залежності маси  $M$  проєктованих ножиць від максимальної ширини  $B$  розрізуваного плоского металопрокату, отримані для трьох умовних марок сталі (з межею міцності 300 МПа, 500 МПа та 800 МПа)

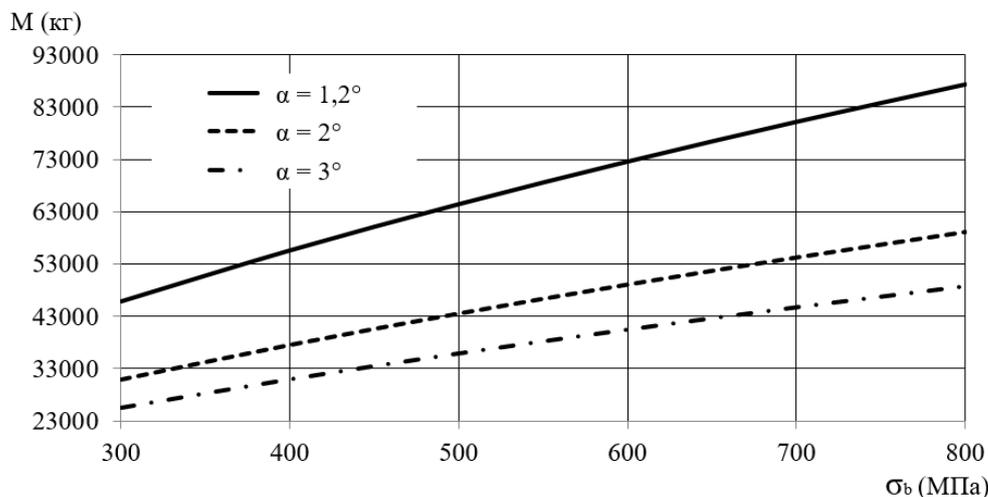


Рис. 3. Залежності маси  $M$  проєктованих ножиць від межі міцності  $\sigma_b$  розрізуваного плоского металопрокату, отримані для трьох значень кута  $\alpha$  нахилу прямолінійних площин шевронного ножа  $1,2^\circ$ ,  $2^\circ$  та  $3^\circ$

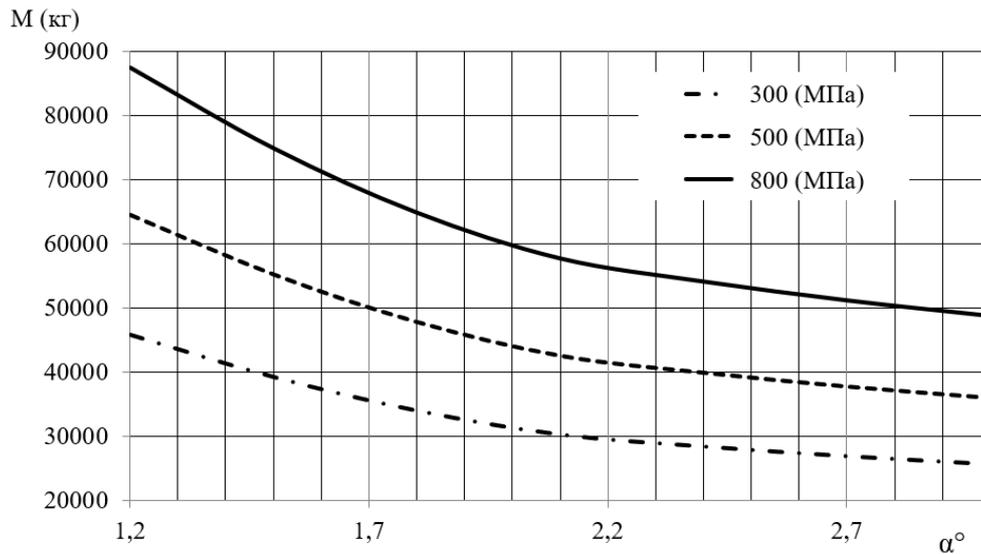


Рис. 4. Залежності маси  $M$  проєктованих ножиць від кута  $\alpha$  нахилу прямокутних площин шевронного ножа, отримані для трьох умовних марок сталі (з межею міцності 300 МПа, 500 МПа та 800 МПа)

лопрокату класичним шевронним ножом, з забезпеченням необхідних показників якості готової металопродукції.

Загалом, у модельованому діапазоні, збільшення зазначеного кута на  $2,8^\circ$  привело до зменшення металоємності проєктованих ножиць в середньому на 44% для усіх трьох модельованих умовних марок сталі (при незмінних інших технологічних параметрах розділової операції), однак, слід враховувати, що збільшення кута нахилу прямокутних площин шевронного ножа, потенційно, призводить до збільшення дефекту у вигляді залишкової деформації частини плоского металопрокату, яка у процесі розрізання знаходиться під шевронним ножом. Наявність такого дефекту суттєво впливає на якість готової продукції та її товарний вигляд [2, 7, 8, 10]. Таким чином, значення кута нахилу прямокутних площин шевронного ножа також має суттєвий вплив на металоємність проєктованих ножиць. При цьому характер цього впливу є неоднорідним, що необхідно враховувати при визначенні оптимальних технологічних параметрів реалізації процесу поперечного розрізання плоского металопрокату шевронним ножом.

На підставі проведеного теоретичного дослідження впливу технологічних параметрів розділової операції на металоємність ножиць для поперечного розрізання плоского металопрокату шевронним ножом, можна стверджувати, що максимальна товщина, ширина та межа міцності розрізуваного плоского металопрокату, а також кут нахилу прямокутних площин застосовуваного шевронного ножа є вагомими факторами, що впливають на металоємність проєктованих ножиць. При цьому характер впливу зазначених факторів досить

суттєво відрізняється, що треба враховувати при висуненні та впровадженні пропозицій щодо виготовлення та поставки обладнання ліній розрізання плоского металопрокату. На практиці потрібна комплексна оцінка впливу цих технологічних параметрів як на металоємність проєктованих ножиць, так і на якість готової продукції.

**Висновки.** Ножиці для поперечного розрізання плоского металопрокату шевронним ножом становлять значну частину номенклатури обладнання, яке випускається машинобудівними виробництвами для оснащення ліній розрізання сучасних прокатних станів. При цьому на етапі обробки замовлення на поставку таких ножиць необхідно мати можливість попереднього визначення їх металоємності, яка залежить від комплексу факторів, основними з яких є технологічні умови реалізації розділового процесу.

За результатами проведеного теоретичного дослідження встановлено, що товщина, ширина та межа міцності розрізуваного плоского металопрокату, а також кут нахилу прямокутних площин застосовуваного шевронного ножа різною мірою впливають на металоємність проєктованих ножиць. Зокрема, у модельованих діапазонах варіювання зазначених параметрів, найбільш суттєвий вплив на металоємність ножиць має ширина розрізуваного плоского металопрокату, що є очікуваним, оскільки вона безпосередньо зумовлює ширину металоконструкції проєктованих ножиць.

Також значний вплив на металоємність ножиць має кут нахилу прямокутних площин шевронного ножа та товщина розрізуваного металопрокату, адже ці параметри визначають геометрію осередку розрізання, тому безпосередньо впливають на енергосилові показники розділової операції. При цьому

залежність металоємності ножиць від зазначеного кута є нелінійною з явною зміною інтенсивності. Це доцільно враховувати при розробці оптимальних техніко-комерційних пропозицій на виготовлення та поставку ножиць для поперечного розрізання плоского металопрокату шевронним ножом з урахуванням їх собівартості та якості готової продукції.

Результати виконаного дослідження можуть бути в подальшому використані при розробці, тестуванні та впровадженні програмного забезпечення для автоматизованого проєктування технології та обладнання процесу поперечного розрізання плоского металопрокату на ножицях з шевронним ножом.

#### Список літератури:

1. Mori K. Review of Shearing Processes of High Strength Steel Sheets. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2020. Т. 4, №2. С. 54. <https://doi.org/10.3390/jmmp4020054>.
2. Боровік П. В. Розвиток теоретичних основ та вдосконалення технології і обладнання процесів операцій розділення в прокатному виробництві: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.03.05. Краматорськ, 2021. 428 с.
3. A particle finite element method approach to model shear cutting of high-strength steel sheets / O. Sandin та ін. *Computational Particle Mechanics*. 2024. <https://doi.org/10.1007/s40571-023-00708-5>
4. Іщенко А., Капустін С. Аналіз способів розкрою заготовок в лініях прокатних станів. *Наука та виробництво*. 2023. №25. С. 20–26. <https://doi.org/10.31498/2522-9990252023286596>
5. Temperature distribution and structure in the heat-affected zone for steel sheets after laser cutting / A. E. Gvozdev та ін. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2017. Т. 8, №1. С. 148–152. <https://doi.org/10.1134/s2075113317010178>
6. Gustafsson, E., Karlsson, L., Oldenburg, M. Experimental study of forces and energies during shearing of steel sheet with angled tools. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*. 2016. № 11. С. 1–12. <https://doi.org/10.1186/s40712-016-0063-1>
7. Селезньов М. Є., Боровік П. В. Залежність металоємності ножиць від технологічних параметрів процесу розрізання плоского металопрокату. *Scientific and practical journal "Economics and technical engineering"*. 2024. №2(1). С. 133–144. <https://doi.org/10.62911/ete.2024.02.01.11>
8. Селезньов М. Є. Удосконалення технології та обладнання процесів різання товстолистового металопрокату на ножицях: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.05. Краматорськ, 2016. 206 с.
9. Гречаний О. М. Обґрунтування вибору технічних параметрів гільйотинних ножиць прокатного стану. *Металургія*. 2017. Вип. 2(38). С. 126–130.
10. Borovik P. V., Seleznyov M. E. Influence of a chevron type knife design on the quality of sheet material shearing. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. №5. С. 218–223.

#### Seleznov M.Ye., Borovik P.V. ANALYSIS OF SEPARATION PROCESS PARAMETERS INFLUENCE ON THE METAL CAPACITY OF SHEARS WITH A CHEVRON KNIFE

Based on the mathematical modeling results, the influence analysis of the main technological parameters of cross-cutting flat rolled metal process on the metal capacity of the designed shears with a chevron knife was described in the article.

Specifically, the impact of maximum thickness, width, and strength limit of the shearing flat rolled metal, as well as the inclination angle of the straight planes of the chevron knife's shearing edge, were shown. Mathematical modeling process of shearing was carried out by varying these technological parameters within ranges relevant to the development of new shears and improvement of existing shears with a chevron knife. Based on the modeling results, the dependences of the designed shears' mass on these technological parameters of the operation shearing were obtained, and the parameter's influence was assessed. Within the modeled ranges, the width of the shearing flat sheet metal had the most significant impact on the shears' metal consumption, which is expected, as it directly determines the width of the metal structure of the designed shears. Additionally, it was found that the inclination angle of the chevron knife's shearing edge also significantly affects the shears' metal consumption, with a nonlinear inverse relationship between the shears' mass and this parameter, displaying noticeable intensity changes within the modeled range. Thus, for making and implementing proposals of the shears production with a chevron knife for shearing flat sheet metal a comprehensive assessment of these technological parameters' impact on both: the designed shears metal consumption and the quality of the finished product are necessary. The research results can be further used in the development, testing, and implementation of software for automated design of the technology and equipment for the transverse shearing process of flat rolled metal with chevron knife shears.

**Key words:** shears, shearing, flat rolled metal, technological parameters, metal capacity, mathematical modeling.

Дата надходження статті: 24.11.2025

Дата прийняття статті: 12.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025