

5. **Evans D.** The Internet of Things: How the next evolution of the Internet is changing everything // CISCO White Paper. - 2011. - Vol. 1. - pp. 1-11.
6. **Zlatanov N.** Arduino and Open Source Computer Hardware and Software // ResearchGate. - 2015.
7. **Mouha R.** Internet of Things (IoT) // Journal of Data Analysis and Information Processing. - 2021. - Vol. 9. - pp. 77-101. - DOI: 10.4236/jdaip.2021.92006.
8. **Bashir A., Alhammadi M., Awawdeh M., Faisal T.** Effectiveness of using Arduino platform for the hybrid engineering education learning model // 2019 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET). - Dubai, United Arab Emirates, 2019. - pp. 1-6. - DOI: 10.1109/ICASET.2019.8714438.
9. **Alam M., Samsudin S., Kamaruddin M., Zakaria Z., Othman R.** Introducing Arduino as an Effective Online Distance Learning Tool in Final Year Project for Chemical Engineering Student // Asean Journal of Engineering Education. - 2022. - Vol. 6. - pp. 69-82. - DOI: 10.11113/ajee2022.6n1.88.
10. The Best Arduino Simulators of 2023 (Online & Offline) [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://all3dp.com/2/best-arduino-simulators-online-offline/>
11. Wokwi [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://wokwi.com>
12. Autodesk Tinkercad [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://www.tinkercad.com>
13. Fritzing [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://fritzing.org>
14. SimulIDE [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://www.simulide.com/p/home.html>
15. Simon Game for Arduino with Score display [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://wokwi.com/projects/328451800839488084>

Рукопис подано до редакції 03.03.2023

УДК 621.771.001

В.А. ЧУБЕНКО, Л.Н. САЙТГАРСЄВ, Т.П. ЯРОШ, кандидати техн. наук, доценти,
А.А. ХІНОЦЬКА, ст. викладач
Криворізький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ ОБТИСНЕННЯ НА ВИТРАТИ ЕНЕРГІЇ ПРИ ХОЛОДНОМУ ПРОКАТУВАННІ ТОНКИХ ЛИСТІВ

Мета: дослідити процес холодного прокатування тонких сталевих листів за допомогою інженерної програми DEFORM 3D для визначення енергосилових параметрів обробки та встановити раціональні режими прокатування для підвищення енергоефективності процесу обтиснення.

Методи дослідження: для дослідження процесів, що відбуваються при виготовленні тонкого листа зі сталевих матеріалів методом холодного прокатування, було виконано моделювання з використанням комп'ютерної програми DEFORM 3D, яка дозволяє точно визначити технологію холодного прокатування та витрати енергії на процес. Під час моделювання було створено модель процесу холодної обробки тонкого листа; задані початкові дані, режими обтиснення і температура обробки, параметри руху прокатних валків та оброблюваної смуги, коефіцієнт тертя; обрано матеріал заготовки і встановлено його властивості. Визначено тип об'єктів моделювання, де встановлено, що інструмент має жорсткий тип, а оброблюваний матеріал – пластичний. Головним призначено верхній прокатний валок. При моделюванні процесу холодного прокатування листового матеріалу використовувався аналіз Лагранжа. Було визначено кількість кроків моделювання, яка дорівнювала 100. Обробка відбувалася у системі SI.

Наукова новизна: вперше отримані аналітичні залежності для визначення енергосилових параметрів холодного прокатування тонких сталевих листів за допомогою моделювання процесу методом дискретних елементів

Практична значимість: визначено раціональні режими обробки металу для удосконалення технологічного процесу холодного прокатування тонких листів.

Результати. Виконано дослідження процесу пластичної деформації матеріалу за криволінійною сіткою, визначено поле векторних переміщень і встановлено, що максимальне переміщення сталевих матеріалів здійснюється під дією верхнього прокатного валка, досліджено розподіл напружено-деформованого стану оброблюваного матеріалу і визначено максимальні напруження в зоні деформації. Вивчено розподіл зусиль прокатування і крутного моменту, що дозволило визначити їхні максимальні значення, які спостерігаються на 7-9 секунд обробки. В подальшому величина цих показників зменшується через зникнення захоплюваних сил і встановлюється сталий процес холодного прокатування.

Ключові слова: моделювання, осередок деформації, прокатний валок, тонкий лист, холодна прокатка, витрати енергії, комп'ютерна програма

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. У металургійній промисловості для отримання тонких листів широко використовуються технології прокатування в холодному стані. Такий технологічний процес дозволяє отримати листові вироби точного роз-

міру та високої якості як зовнішньої поверхні, так і внутрішнього шару. Процес холодного прокатування є доволі трудомістким; крім того, для його реалізації потрібні великі витрати енергії та складне обладнання. Розподіл зусиль і деформації при обтисненні під час холодної обробки дуже складно дослідити у виробничих умовах через дуже високу вартість таких експериментів.

Використання комп'ютерних програм, здатних відтворювати процеси обробки металів тиском, дозволить значно спростити умови дослідження процесів прокатного виробництва. Такі програми дозволяють створювати моделі, які точно відображають параметри обробки тиском, де можна прослідити усі перетворення, що відбуваються при обтисненні металевих листів. Дослідження процесу холодного прокатування за допомогою інженерного програмного комплексу DEFORM 3D є актуальним, тому що воно дозволяє суттєво скоротити час на проведення експериментів, прискорює процес визначення раціональних режимів обробки, які в подальшому забезпечать зменшення витрат зусиль та енергії, покращення якості виробів, збільшення продуктивності процесу та зменшення собівартості тонких листів.

Аналіз досліджень та публікацій. Сталеві тонкі листи широко використовують в машинобудуванні при виготовленні автомобілів, літаків, побутової техніки тощо. Тонколистову сталь виготовляють холодним прокатуванням на станах холодної обробки. Такі технології дозволяють отримати листи товщиною 0,15-1,8 мм і шириною 700-2300 мм, жерсть та стрічки при товщині 0,0015 мм. Вихідним матеріалом для холодного прокатування є гарячекатана сталь, що має товщину 1,6-6 мм [1]. Виробництво холоднокатаних листів, що отримують у цехах холодного прокатування, враховує велику кількість переділів і вимагає використання різноманітного, складного і вартісного устаткування [2]. До якості поверхні холоднокатаної листової сталі пред'являють високі вимоги з міцності, стійкості матеріалу, шорсткості поверхні.

Холодне прокатування істотно змінює властивості металів: при збільшенні величини обтиснення границя течії металу й опір пластичній деформації збільшуються, подовження смуги зменшується [3], що призводить до ускладнення процесу обробки тиском. Величина обтиснення при прокатуванні має суттєвий вплив на властивості матеріалу через те, що відбувається зміна розміру зерна внутрішньої будови та межі між ними у металевих виробах [4]. Величина обтиснення при прокатуванні визначає зміну витрат енергії, що в свою чергу впливає на вартість прокатного виробництва. Процеси холодного прокатування потребують подальшого вивчення, дослідження й удосконалення з метою покращення якості виробу, зменшення витрат енергії та собівартості виробництва. Об'ємні переміщення металу в осередку деформації при прокатуванні недоступні для прямого наочного вивчення, а експерименти не можуть врахувати одночасний вплив всіх технологічних чинників обтиснення, через що багато відомих на сьогодні результатів можуть бути використані лише для умов, в яких вони отримані [5]. Методи комп'ютерного моделювання відкривають широкі можливості при вирішенні завдань з обробки металів тиском [6].

У теорії прокатного виробництва велику популярність отримали методи кінцевих елементів, скінченних різниць і граничних елементів, метод кінцевих об'ємів [7]. Відомо [8], що при обтисненні смуги прокатними валками утворюється осередок деформації, на що витрачається велика кількість енергії та створюється складний напружено-деформований стан металу [9-11]. Моделювання з метою дослідження енергосилових параметрів дресування листів було виконано у роботі [12]. Велика кількість досліджень з використанням методів кінцевих елементів [13, 14] присвячена проблемі течії металу під час деформації, але слід зазначити, що у цих роботах не досліджується процес холодного прокатування тонких листів.

У роботі [15] було використано інженерний програмний комплекс DEFORM 3D для дослідження процесів гарячого прокатування листів, де було ретельно вивчено характер формозміни металу, мікроструктуру виробів, енергетичні витрати на процес, але не досліджувалися особливості холодного прокатування тонких листів. Тому можна вважати, що в попередніх дослідженнях недостатньо приділено уваги вивченню впливу ступеня обтиснення на витрати енергії при моделюванні холодного прокатування тонких листів за допомогою програми DEFORM 3D.

Постановка задачі: дослідити процес холодного прокатування тонких листів за допомогою програми DEFORM 3D для визначення впливу величини обтиснення матеріалу на витрати енергії при обробці. Для вирішення цієї мети поставлені наступні задачі: створити модель холодного прокатування тонкого листа в програмному комплексі DEFORM 3D; визначити зусилля для деформації та їх розподіл в осередку при холодній обробці.

Викладення матеріалу та результати. Для моделювання холодного прокатування було використано режим обробки, в якому задано вихідні параметри виробу: довжина смуги $l=1000$ мм, ширина $b=1000$ мм, висота $h=5$ мм. Діаметр прокатних валків 200 мм, довжина 1200 мм. Процес прокатування починався при температурі 20 °С. У процесі дослідження змінювався ступінь обтиснення матеріалу з метою визначення раціонального режиму обробки.

За допомогою комп'ютерної програми DEFORM 3D змодельовано вихідну заготовку, розташовано її у просторі, визначено параметри взаємодії інструменту і заготовки, умови тертя та характер теплообміну, виконано позиціонування прокатних валків відносно заготовки, як показано на рис. 1.

На схемі зображено процес захоплення металу прокатними валками, що відбувається на початковій стадії прокатування (першому кроці моделювання). Зі схеми видно, яким чином відбувається взаємодія валків і оброблюваного матеріалу. Прокатні валки обтискують прокатний матеріал, обертаються, смуга рухається поступово назустріч обертанню валків.

На заготовці створено сітку кінцевих елементів, як показано на рис. 1 і 2. Кількість цих елементів дорівнює 2051.

Головним прийнято верхній валок, який обтискує метал за висотою. Виконано позиціонування інструменту відносно заготовки (рис. 2).

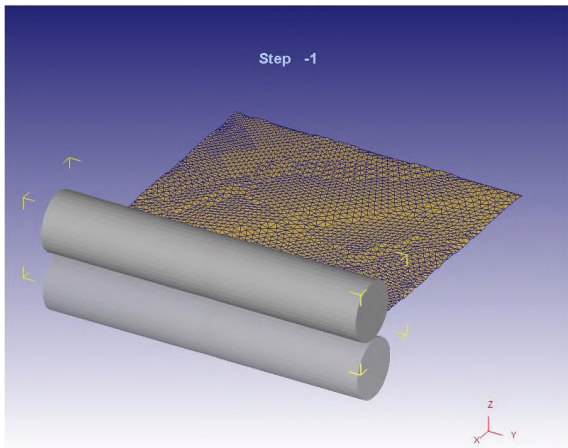


Рис. 1. Схема захоплення листа прокатними валками

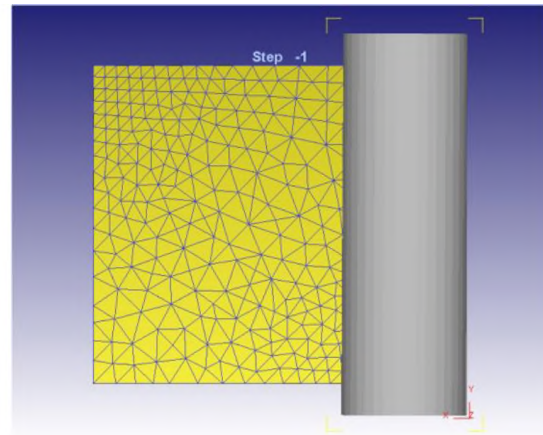


Рис. 2. Позиціонування інструменту відносно заготовки (вид зверху)

Матеріал оброблюваної заготовки обрано з бібліотеки комп'ютерної програми. У дослідженнях було використано холоднокатаний лист з вуглецевої сталі AISI-1015_(20-1200С). Визначено його властивості: напруження течії металу та зміна величини напруження в залежності від ступеня обтиснення.

Діаграму напруження-деформація представлено на рис. 3, з якої видно, що при ступені обтиснення, меншому відбувається пружна деформація металевих виробів.

Пластична деформація, при якій матеріал здатен змінювати свою форму та розміри, починається тоді, коли ступінь обтиснення перевищить 35 %.

Границю течії металу визначали за енергетичним законом [15]

$$\sigma = \varepsilon^n \cdot u^m + y, \quad (1)$$

де σ – ефективне напруження пластичної течії металу, ε – ступінь деформації, u – швидкість деформації; n – показник ступеня деформації, m – показник швидкості деформації, y – стала матеріалу.

Ступінь деформації ε визначався за формулою

$$\varepsilon = \Delta h / h_0, \quad (2)$$

де Δh – абсолютне обтиснення, що визначається за формулою

$$\Delta h = h_0 - h_1, \quad (3)$$

де h_0, h_1 – відповідно початкова та кінцева товщина смуги.

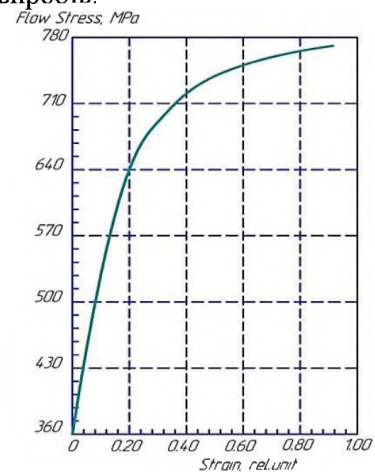


Рис. 3. Діаграма напруження-деформація

Визначено пружні властивості матеріалу, які характеризуються модулем Юнга E та коефіцієнтом Пуассона μ . Ці коефіцієнти прийнято сталими величинами, які дорівнюють відповідно $E=0,3$ і $\mu=1,5 \cdot 10^5$.

Після позиціонування об'єктів у просторі при холодному прокатуванні задано точність позиціонування. Коефіцієнт прокатування прийнято для процесу холодної обробки рівним 0,1. Запропоновано умову, що фізична модель тертя при обробці тиском описується формулою Зибеля. Згенеровано контакт між заготовкою та верхнім і нижнім прокатними валками.

Визначено методи розрахунку та параметри моделювання. Встановлено систему одиниць SI. При моделюванні використовувався аналіз Лагранжа, було прийнято режим моделювання – деформація.

Задано типи об'єктів: оброблювану заготовку віднесено до пластичного типу, де аналіз виконується на підставі заданих значень границі течії металу; інструмент визнано жорстким, тобто недеформівним, матеріалом. Задано рух верхнього прокатного валку та його швидкість.

Таким чином, було сформовано базу даних для моделювання, що дозволило виконати дослідження процесу прокатування та визначити його основні характеристики, зміни напруження та деформації при холодній обробці, дослідити перетворення в осередку деформації, що утворюється при прокатуванні, зміни зусиль і моментів деформації.

Процес моделювання здійснювався в програмі DEFORM 3D; кількість кроків дорівнювала 100.

Теоретичні дослідження зусилля прокатування виконувалося за формулою [3]

$$P = \sigma_n b \sqrt{\Delta h R}, \quad (4)$$

де σ_n – коефіцієнт напруження [2], b – ширина листа.

Моделювання дозволило дослідити процес течії металу по викривленій координатній сітці. Було визначено векторне поле переміщення (рис. 4), з якого видно, що максимальне переміщення металу відбувається під дією верхнього прокатного валка, який і є головним деформувальним інструментом.

З рисунка 4 також видно, що векторне поле переміщення досягає максимальних значень на початку процесу прокатування, коли відбувається захоплення металу прокатними валками. Далі процес прокатування відбувається в сталому режимі, що супроводжується зменшенням інтенсивності векторного поля.

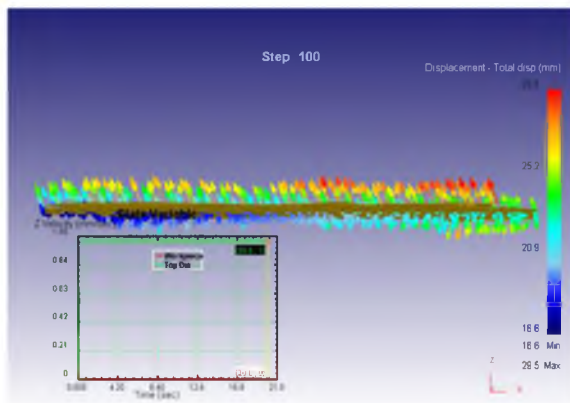


Рис. 4. Векторне поле переміщення металу при прокатуванні

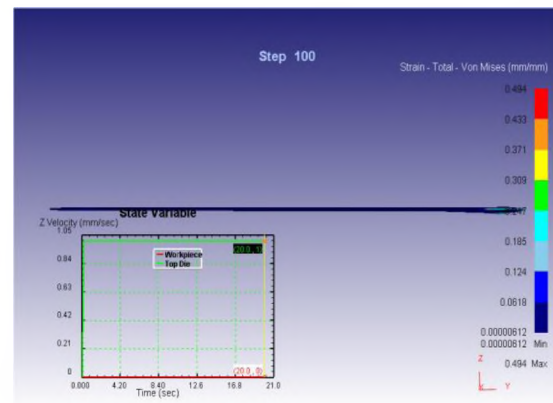


Рис. 5. Розподіл напруження при холодному прокатуванні

При моделюванні процесу виявлено напружено-деформований стан заготовки (рис. 5). Встановлено максимальні напруження, що знаходяться саме в осередку деформації та досягають 0,309 мм/мм.

Досліджено зміну сили прокатування (P) в часі при холодній обробці. На рис. 6 чітко простежується збільшення зусиль прокатування в перші 9 секунд, які досягають максимальних значень на рівні 5,5 МН. При подальшому протіканні процесу спостерігається зменшення зусилля прокатування. Це пояснюється тим, що відбувся процес захоплення, і настав сталий рух прокатування, який характеризується відсутністю захоплювальних сил і зусиль обтиснення, а рух металу відбувається самочинно.

У виробничих умовах на цих режимах сила прокатування дорівнює 5,3 МН, що свідчить про високу точність моделювання в програмі DEFORM 3D.

Графік зміни крутного моменту (М), який створює верхній прокатний валок (рис 7), показав, що має місце зміна крутного моменту на початку процесу холодного прокатування з досягненням максимальних значень на 7 секунд від початку процесу. Далі процес прокатування переходить у стабільний режим, який характеризується зменшенням крутного моменту. Параметри, що були отримані під час моделювання, використано в подальших теоретичних розрахунках.

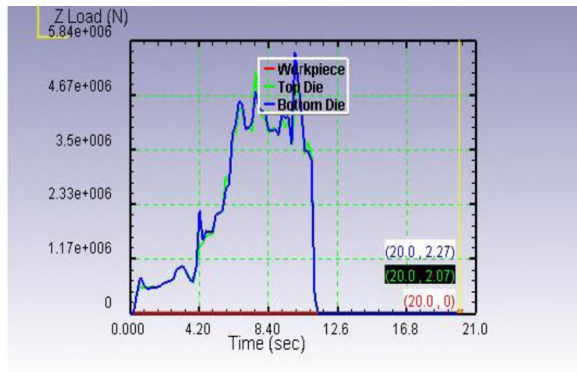


Рис. 6. Зміна сили прокатування в часі

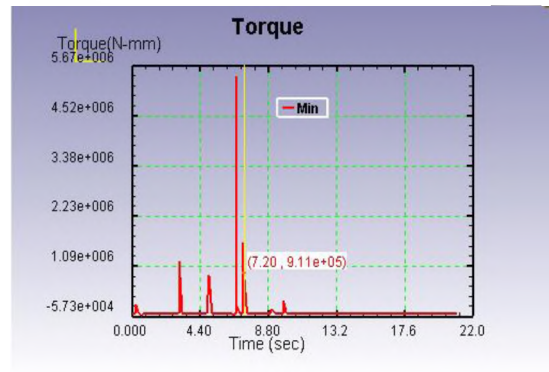


Рис. 7. Зміна крутного моменту в часі

Дослідження дозволили визначити раціональні режими обтиснення в умовах холодного прокатування тонких листів. Встановлено, що ефективний ступінь деформації знаходиться на рівні 70 %. Така величина дозволяє отримати листи з максимальною твердістю, які здатні до пластичної деформації. Підвищення ступеня деформації призводить до негативних наслідків: потребує збільшення енергетичних витрат, зростання зусиль і моментів прокатування, збільшує напруження поверхневого шару металу, призводить до пружного зміщення валків, що погіршує якість отриманих листів, призводить до виникнення технологічних дефектів, таких як мікротріщини та мікрволокна. Зменшення ступеня деформації призводить до зниження твердості та міцності матеріалу, що дає змогу листовому виробу деформуватися під дією навантаження під час експлуатації. Крім того, зменшення величини обтиснення є причиною зниження продуктивності процесу обробки. Результати дослідження наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Результати дослідження силових параметрів холодного прокатування тонких листів

σ , МПа	b , mm	h_0 , mm	h_1 , mm	ϵ , %	Δh	P , MN	M , MNm
740	1000	5	1,5	70	3,5	5,5	0,198
765	1000	7	1,5	78,6	5,5	6,9	0,248
735	1000	4	1,5	62,5	2,5	4,9	0,176

Висновок і подальший напрямок дослідження створено модель холодного прокатування тонкого листа в програмному комплексі DEFORM 3D і розроблено методику дослідження, що дозволило визначити зміни енергосилових параметрів процесів, які відбуваються в осередку деформації при обробці; визначено зусилля деформації та їх розподіл в осередку, встановлено витрати енергії та раціональні режими обтиснення в процесі холодного прокатування тонких листів, що забезпечує виготовлення якісних виробів.

Список літератури

1. **Чубенко В.А., Хіноцька А.А.** Технологія процесів прокатування: Навчальний посібник. – Кривий Ріг: Видавець ФОП Чернявський Д.О., 2017. – 170 с.
2. **Бережний М.М., Чубенко В.А.** Основи проектування технологічних ліній та комплексів металургійних цехів: Монографія. – Кривий Ріг: Видавничий дім, 2010. – 444 с.
3. **Данченко В.М., Гринкеч В.О., Головка О.М.** Терія процесів обробки металів тиском: Підручник. – Дніпропетровськ: Пороги, 2008. – 370 с.
4. Визначення впливу режиму обтиснення при прокатуванні на внутрішню будову металу / **В.А. Чубенко, А.А. Хіноцька** // Качество минерального сырья. Кривой Рог, 2018 Т2 С. 151-159.
5. Процессы деформации металла на основе многовалковых калибров: Монография [Текст] / **И.К. Огинский, В.Н. Данченко, А.А. Самсоненко, В.В. Бояркин.** – Днепропетровськ: Пороги, 2011. – 355 с.

6. Компьютерное моделирование процесса обработки металлов давлением [Текст] / **В.Н. Данченко, А.А. Миленин, В.И. Кузьменко, В.А. Гринкевич.** – Днепропетровск. Системные технологии, 2005. – 448 с.
7. Компьютерное моделирование в инженерной проактике/ **А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов** [и др.]/ Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2005. – 799 с.
8. Исследование очага деформации при продольном прокатывании с точки зрения реологической концепции [Текст] / **Н.Н. Бережной, В.А. Чубенко, А.А. Хинопкая, С.О. Мацишин** // Восточно-Европейский журнал передовых технологий – том 1 № 7 (73) (2015), - с. 31-35 doi:10.15587/1729-4061.2015.38059.
9. **Kodjaspurov, G.E.** Effect of thermomechanical processing on structure and corrosion-mechanical properties of AISI 321 steel [Text] / G.E. Kodjaspurov, A.I. Rudkoy, V.V. Rybin // Advanced Materials Research. – 2010 – Vol. 89-91. – P. 769–772. doi:10.4028/www.scientific.net/amr.89-91.769.
10. **Faraji, G.** Accumulative Torsion Back (ATB) Processing as a New Plastic Deformation Technique [Text] / G. Faraji, H. Jafarzadeh //Materials and Manufacturing Processes. – 2012 – Vol. 27, Issue 5 – P. 507–511. doi: 10.1080/10426914.2011.593235
11. Вплив швидкості деформації на зміну напруження при поздовжньому прокатуванні [Текст] / **В.А. Чубенко, А.А. Хинопка** //Гірничий вісник. – 2019, Випуск 105. – С. 42 – 46.
12. **Тимофеева М.А.** Исследование и моделирование энергосиловых параметров процесса дрессировки для совершенствования технологий и оборудования дрессировочных станков: Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 05.02.13 «Машины, агрегаты процессы металлургического производства»/ М.А. Тимофеева. – Череповец, 2006. – 24 с.
13. **Huey–Lin Ho.** A study of improving warped characteristics during flange forging [Text] / Huey–Lin Ho, Su–Hai Hsiang, Chia–Ju Chang // Journal of materials processing technology 201. – 2008. – P. 14–18.
14. **Monaghan J.** An investigation of plane-strain lateral extrusion to form components having staggered branches [Text] / J. Monaghan // Journal of Materials Processing Technology. – 1998. – 77. – P. 305–313.
15. Практическое руководство к программному комплексу DEFORM-3D: учебное пособие [Текст] / **В.С.Паршин, А.П. Карамышев, И.И. Некрасов** и др. – Екатеринбург: УрФУ, 2010. – 266 с.

Рукопис подано до редакції 06.03.2023

УДК 669.162.26

К.О. ШМЕЛЬЦЕР, канд. техн. наук, доц., **М.В. КОРМЕР**, канд. хім. наук, доц.,
Д.О. КАССИМ, д-р техн. наук, проф., **І.А. ЛЯХОВА**, канд. техн. наук, доц.
Державний університет економіки і технологій

КЕРУВАННЯ ЯКІСТЮ КОКСУ ДЛЯ СТАБІЛІЗАЦІЇ ЙОГО МЕТАЛУРГІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

Мета. Підвищення показників якості коксу при обмеженні переведення доменного коксу у відсів (зниження втрат доменного коксу) за рахунок установки оптимального кута нахилу безперервно або періодично працюючого відкритого або закритого промислового циліндричного похилого барабана-стабілізатора, який забезпечує необхідне число обертів для механічної обробки коксу.

Методи дослідження. Механічна обробка коксу у барабані Мікум.

Наукова новизна. Запропоновано спосіб механічної обробки доменного коксу для поліпшення вихідних показників його якості M_{25} , M_{10} і класу >80 мм у промисловому циліндричному похилому барабані-стабілізаторі. Запропонований агрегат може замінити валковий грохот та використовуватися на коксових сортувальнях в доменному або коксовому цехах для підвищення холодних показників якості коксу для доменної плавки.

Практична значимість. Перевагою та відмінністю методу є те, що кут нахилу барабана-стабілізатора до горизонту і кількість його обертів вибирають з оптимального числа обертів випробувального барабана Мікум по динаміці поліпшення вихідних показників якості коксу за кожен 1-2 оберти барабана з урахуванням сум добуток показників якості на коефіцієнти впливу кожного показника і на величину питомої витрати коксу в доменній печі. Кількість обертів барабана-стабілізатора обмежують величиною втрат коксу для доменної плавки, не допускаючи збільшення класу <25 мм більше 3,0-3,5% від вихідної величини.

Результати. Використання процесу механічної обробки кусків коксу дозволяє не тільки стабілізувати властивості коксу, а й істотно поліпшити їх аж до отримання заданих, бажаних показників гранулометричного складу, міцності і стійкості до тертя. Вибір раціональних параметрів технології стабілізації показників якості коксу в промисловому циліндричному похилому барабані-стабілізаторі з урахуванням недопущення великих втрат доменного коксу дозволяє значно знизити собівартість чавуну в доменній плавці.

Ключові слова: технологічні властивості вугільної шихти, коксування, доменний кокс, гранулометричний склад, дробимість, стиранність, барабан-стабілізатор.