

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

The Ministry of Education and Science of Ukraine
The Ukrainian State University of Science and Technologies

СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ МЕТАЛУРГІЇ
НАУКОВІ ВІСТІ

MODERN PROBLEMS OF METALLURGY
SCIENTIFIC BULLETIN

№ 26

Дніпро 2023

Dnipro 2023

СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ МЕТАЛУРГІЇ. Наукові вісті. №26, (2023). – Дніпро: УДУНТ – ІВК «Системні технології», 2023. – 140 с.

ISSN 1991-7848 (Print)

ISSN 2707-9457 (Online)

Відповідальний редактор: д.т.н., проф. Селівьорстов В.Ю.

Заступник відповідального редактора: д.т.н., доц. Селівьорстова Т.В.

Відповідальний секретар редакції: к.т.н., с.н.с. Власова Т.Є.

Редакційна колегія збірника:

Балакін В.Ф. д.т.н., проф.,
Гасик М.М. д.т.н., проф. (Фінляндія),
Губінський М.В. д.т.н., проф.,
Гуда А.І., д.т.н., доц.,
Єрьомін О.О., д.т.н., проф.,
Критська Т.В., д.т.н., проф.,
Пінчук В.О., д.т.н., проф.,
Пройдак Ю.С. д.т.н., проф.,
Саричев О.П., д.т.н., проф.,
Светличний Д.С. д.т.н., проф. (Польща),
Селівьорстов В.Ю., д.т.н., проф.,
Тараканов А.К. д.т.н., проф.,
Фролов Я.В., д.т.н., проф.

Збірник друкується за рішенням Вченої Ради
Українського державного університету науки і технологій
від 23.01.2023 р., № 4

Адреса редакції збірника:
49005, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4,
Український державний університет науки і технологій
ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій»,
кафедра Інформаційних технологій і систем,
e-mail: st@nmetau.edu.ua
+3 8 (097) 685 45 25

© Український державний університет науки і технологій
ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій»,
ІВК «Системні технології», 2023.

DOI: 10.34185/1991-7848.2023.01.01

УДК 621.774

В.В. Бояркін, О.А. Ремез, О.С. Польща

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОФІЛЮВАННЯ ТРУБ КВАДРАТНОГО ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗУ

Анотація. *Леговані манганом та бором сталі все ширше використовують в машинобудуванні, у тому числі авто- і сільськогосподарському. Вироби відповідального призначення з таких сталей, у тому числі порожнисті, мають високий рівень механічних властивостей, твердості поверхні та зносостійкості. Такі вироби отримують профілюванням попередньо електрозварних круглих труб гарячою листовою штамповкою або іншими видами обробки тиском (волочінням, холодною прокаткою, штампуванням). Технологічні параметри комбінованих процесів обробки часто визначають за допомогою результатів експериментальних досліджень, що з огляду на складність і вартість матеріалів призводить до значних витрат. Використання математичного моделювання дозволяє зменшити кількість експериментів та прогнозувати якість готових виробів. Дослідження присвячені перевірці можливості отримання квадратних труб прошовхуванням в одній кліті трубоелектрозварювального агрегату та визначенні вимог до геометричних параметрів заготовки.*

Ключові слова: *сталь, профілювання, обробка металів тиском, прошовхування, сила, формозміна.*

Вступ

Застосування профільних труб простого поперечного перерізу, у тому числі квадратних, полягає в різкому зниженні витрат металу на відходи при виготовленні заготовок, скороченні циклу обробки і витрат у споживачів, зменшенні парку метало-оброблюваного обладнання для забезпечення заданого обсягу виробництва заготовок, зниженні потреби при робочій силі в виробництвах металообробки [1-3]. Квадратні і прямокутні труби, у тому числі зі сталей, легованих бором, що встановлюються в різних конструкціях, мають велику в порівнянні з круглими несучу спроможність на одиницю маси, що

дозволяє отримати значну економію металу, знизити вагу заготовок, а також поліпшити умови зборки машин і конструкцій [4]. Граничні відхилення розмірів і допуски форми, а також граничні відхилення маси порожнистих профілів холодного формування не повинні перевищувати значення, наведені, наприклад, у вітчизняних стандартах [5, 6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Наразі у виробництві використовується кілька способів формування і профілювання труб квадратного перерізу, що відрізняються характером течії металу, тому методики розрахунку параметрів робочого інструменту для цих способів також відрізняються.

Профілювання, тобто формозміна круглої трубної заготовки з утворенням необхідної профільної труби, може здійснюватися безперервно в лінії трубоелектрозварювального агрегату ТЕЗА (неперервне профілювання) або поза лінією на окремо встановленому обладнанні (поштучне профілювання). Поштучне профілювання проводять, як правило, волочінням або прокаткою на багатоклітьових безперервних станах, для поштучного виробництва труб також застосовують експандування.

Способи профілювання шляхом волочіння через волочильні кільця характеризуються низькою ефективністю, оскільки при їх використанні необхідно виконувати забивання головки, нанесення на заготовку підмастильного шару і змащення з подальшим його видаленням. До недоліків можна віднести також високу енергоємність і складність виготовлення волочильного інструменту з дорогих твердих сплавів. Основними недоліками способів профілювання шляхом волочіння через роликові волокни є велика витрата металу, викликана необхідністю забивання головки, а також низька продуктивність через багатоциклічність процесу [7, 8].

В даний час в Україні квадратні труби виробляються в лініях ТЕЗА на всіх основних трубних підприємствах. Для профілювання використовують декілька клітей калібруючого стану.

Теоретичними дослідженнями зміни форми поперечного перерізу при профілюванні показано, що можливе створення випуклості або увігнутості

сторін є результатом поступової зміни форми заготовки під впливом зовнішніх навантажень і не пов’язане із втратою стійкості. Такий підхід дозволив зробити дуже важливий для розробки технології та обладнання висновок: кількість профілюючих клітей (кількість проходів) не є визначаючою, з точки зору виготовлення труб без випуклості або увігнутості, тобто профільні труби з прямолінійними сторонами і малими зовнішніми радіусами їх сполучення можуть бути отримані і за один прохід в одній чотирьохвалковій кліті, валки якої мають відповідну калібровку [9].

Сили при проштовхуванні трубної заготовки через чотирьохвалкову неприводну кліть будуть створювати задній осьовий підпір (осьове стискуjące напруження), який сприяє кращому заповненню калібру і створює більш сприятливі умови для зовнішніх радіусів сполучення сторін труби, а також полегшує умови захвату в порівнянні з кліттю з приводними валками. Такий спосіб забезпечує значну економію енергії, матеріалу робочого інструмента, часу на установку і зміну калібру, однак має і недоліки: внаслідок наявності заднього підпору можливе додаткове потовщення стінки, наявний метод розрахунку не дозволяє визначити величину сили проштовхування, тому дослідження формозміни за допомогою сучасних методів комп’ютерного моделювання є актуальними.

Мета дослідження

Для вивчення механізму формозміни та енергосилових параметрів процесу було сформульовано такі задачі:

- провести теоретичне дослідження механізму появи випуклості (увігнутості) сторін профілю, стовщення стінки і сили профілювання в залежності від таких факторів, як матеріал і геометричні розміри заготовки, форма і розміри чотирьохвалкових калібрів;
- проаналізувати результати досліджень і одержати математичний опис залежності сили профілювання від матеріалу і геометричних розмірів заготовки;
- визначити залежності випуклості (увігнутості) сторін профілю та стовщення стінки від параметрів товстостінності заготовки.

Основні матеріали дослідження

Для теоретичного дослідження механізму формозміни використовувалась програма QForm [10]. QForm – поширений програмний комплекс для математичного моделювання різних процесів обробки металів тиском на основі методу скінчених елементів.

Для створення тривимірної моделі чотирьохвалкового калібру проведено розрахунки геометричних параметрів калібру за методиками, наведеними в роботах [2, 9].

Розрахунок значення радіусу увігнутості робочої поверхні профілювальних валків для прокатки квадратної труби:

$$R_n = \frac{E_K \cdot J \cdot l}{2 \cdot P_B \cdot r^2} + \sqrt{\left(\frac{E_K \cdot J \cdot l}{2 \cdot P_B \cdot r^2}\right)^2 + \frac{1}{r^2} \cdot \left[\left(\frac{E_K \cdot J}{P_B}\right) + \frac{l^4}{16}\right]},$$

де E_K – дотичний модуль пластичності, Па; J – момент інерції боку одиничної довжини уздовж осі труби, м⁴; P_B – вертикальна сила, яка діє на профілюючий валок, Н; l – сторона квадратної труби, м; r – радіус заокруглення в куті квадрату, м.

Вертикальна сила, що діє на профілюючий валок:

$$P_B = 0,5 \cdot \sigma_T \cdot S^2 \cdot \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R_T}\right),$$

де σ_T – опір деформації, Па; R_T – радіус труби після калібрувальної групи клітей, м.

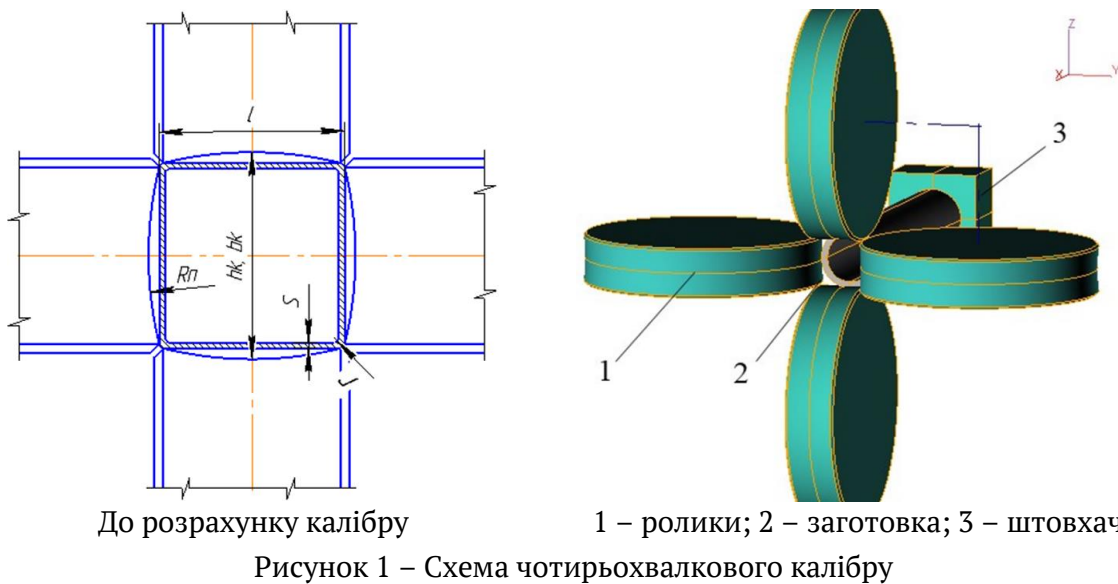
Глибина рівчака на валку представлена таким виразом:

$$h_a = R_n - \sqrt{R_n^2 - \frac{(1 - 2 \cdot r)^2}{4}}$$

Висота (ширина) калібру:

$$h_k = 1 + 2 \cdot h_a$$

Схема калібру наведена на рисунку 1. За результатами розрахунків були створені тривимірні моделі труби-заготовки, роликів та штовхача.



Для розрахунків були використані реологічні властивості сталі 19MnB4.

Сили тертя між заготовкою та інструментом при прокатці розраховувались по моделі Леванова, також був заданий коефіцієнт Леванова 1,25 і фактор тертя 0,5, що відповідає умовам прокатки без застосування змащувальних матеріалів.

Зовнішній діаметр заготовки – 20 мм, товщина стінки змінювалась від 0,5 до 3,5 мм з кроком 0,25 мм. Для кожного значення товстостінності заготовки отримувались дані щодо значення сили і фіксувалась максимальна величина (рис. 2).

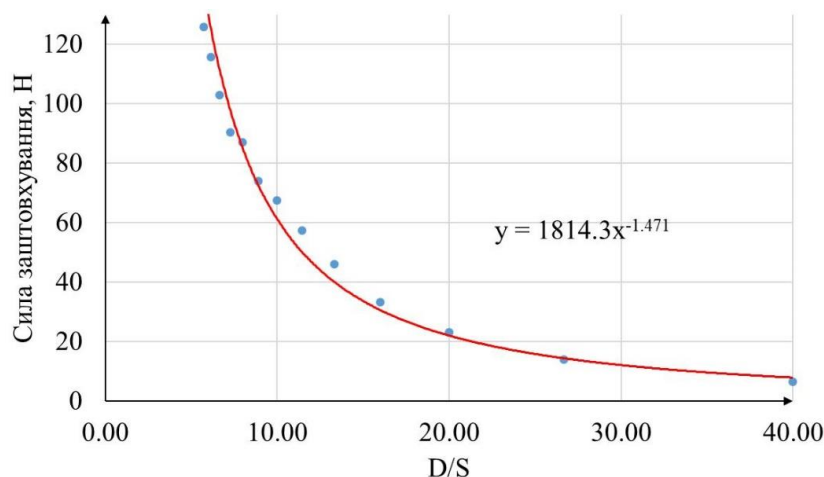
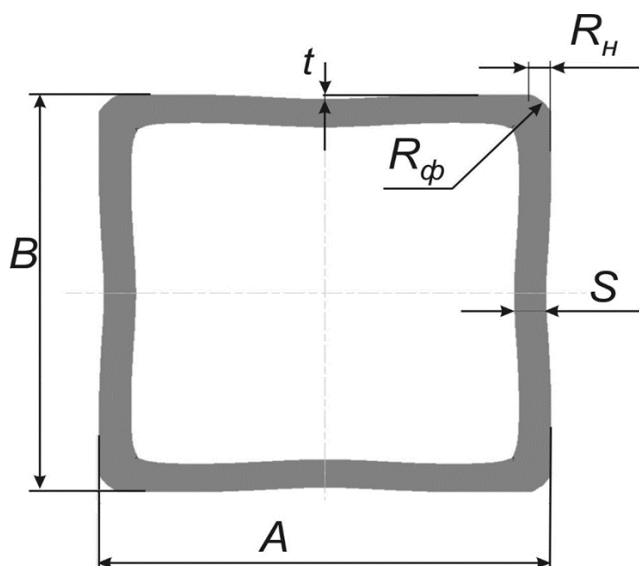


Рисунок 2 – Величина сили проштовхування в залежності від товстостінності заготовки

Дослідження формозміни поперечного перерізу з використанням створеної моделі показали, що в даному випадку напруження, що розтягають, розподілені на внутрішній частині вертикальної сторони і на зовнішній поверхні кутової ділянки; напруження, що стискають, розподілені по зовнішнім шарам прямої вертикальної ділянки і по внутрішній частині кутової зони. Аналіз отриманих даних показав, що безпосередньою причиною прогину по центру боку профілю труби є наявність в цьому перерізі напружень, що розтягають, у внутрішніх шарах і напружень, що стискають, в зовнішніх шарах з початку процесу формозміни. Від перерізу, що проходить через середину сторони по товщині, на внутрішній поверхні діють напруження, що розтягають, спрямовані в протилежні сторони до кутів труби, що і призводить до максимального прогину в цьому перерізі. При використанні інструменту з радіусом, рівним ∞ (тобто в валках з гладкою бочкою), така картина розподілу напружень залишається постійною до досягнення ступеня обтиску, при якому деформація зосереджується в кутових ділянках. Прогин в цьому випадку максимальний. Зменшення радіуса рівчака валка призводить до того, що при певному, меншому, ніж при використанні валків з гладкою бочкою, ступені обтиску профілю по висоті починають діяти тільки напруження, що стискають, по всьому перерізу середини сторони. Це є наслідком зміни місця та напрямку прикладеного контактного навантаження. При профілюванні труб з однаковими радіусами заокруглення в кутах на гладкій бочці і в валках з рівчаками по радіусу спостерігається різна картина формування сторін профілю. Це пов'язано з тим, що в перший момент сторона припиняє розгинатися, і вся деформація зосереджується в кутових ділянках. Аналіз отриманих даних підтверджує залежність форми сторін профілю від місця контакту інструменту і поверхні профільованої труби, а також від співвідношення D/S заготовки. Отриманий після моделювання процесу профілювання валками з гладкою бочкою профіль труби з увігнутістю сторін (як частинний випадок випуклості) та стовщенням в кутах представлений на рисунку 3.

Процес профілювання можливо умовно розбити на дві стадії. Спочатку відбувається загин і розгин різних ділянок поперечного перерізу, а при певній величині радіуса заокруглення до деформації згину додається осадження в

кутах профілю. Зі збільшенням товстостінності заготовки процес осадки в кутах настає раніше, при відносно великих радіусах заокруглення. У зв'язку з цим по всьому поперечному перерізу сторони раніше починають діяти тільки стискаючі напруження, що підтверджується результатами моделювання. Така картина напруженого стану веде до припинення збільшення прогину, що почався в початковій стадії профілювання, коли через розгинання по перерізу сторони профілю діють напруження різного знаку. При профілюванні тонкостінних труб за період згину прогин сторони досягає більшого абсолютного значення, що не дозволяє отримувати такі труби в калібрах, валки яких мають гладку бочку.



A, B – сторони труби, t – товщина стінки

Рисунок 3 – Профіль готової труби з ефектами формозміни

Висновки

З використанням методу скінчених елементів створено математичну модель процесу профілювання квадратних труб в неприводній чотирьохвалковій кліті проштовхуванням. Показана можливість реалізації сталого процесу при різних значеннях товстостінності заготовки. Визначено, що зі збільшенням показника D/S заготовки для труб зі сталі 19MnB4 спостерігається падіння величини, що відповідає за силу проштовхування заготовки. Отримані дані було апроксимовано та описано залежністю, що може

бути використана в інженерних розрахунках. З ростом показника D/S заготовки для труб зі сталі 19MnB4 спостерігається падіння величини відносного потовщення товщини стінки готової труби в кутових зонах та зростання величини увігнутості сторони готової труби.

ЛІТЕРАТУРА

1. Стальные трубы. Изготовление, применение, сортамент: Справочник / Ю.Г. Гуляев [та ін.] – Днепропетровск: РИА «Днепр-ВАЛ» 2002. – 350 с.
2. Данченко В.Н. Производство профильных труб / Данченко В.Н., Сергеев В.В., Никулин Э.В. - М.: Интермет Инжиниринг, 2003. -224с.
3. Бояркін В. В., Ремез О. А., Польща О.С. Математичне моделювання процесу профілювання труб. Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні – ITMM’2023: тези доп. міжнарод. конф., м. Дніпро, 22 бер. 2023 р. / М-во освіти і науки України, Український державний університет науки і технологій Дніпро, 2023. С. 124 – 127.
4. Hordych, I., Herbst, S., Nürnberger, F., Boiarkin, V., Hubert, O., Maier, H.J. Manufacturing and Virtual Design to Tailor the Properties of Boron-Alloyed Steel Tubes(Book Chapter), Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics, Volume 93, 2020, Pages 21-44. ISSN: 16137736. DOI: 10.1007/978-3-030-38156-1_2
5. ДСТУ EN 10219-1:2006 Профілі порожнисті зварні холодного формування з нелегованих і дрібнозернистих конструкційних сталей для металоконструкцій. Частина 1.
6. ДСТУ EN 10219-2:2006. Профілі порожнисті зварні холодного формування з нелегованих і дрібнозернистих конструкційних сталей для металоконструкцій. Частина 2.
7. Стрижак В.И. Сравнительная эффективность производства профильных труб и замкнутых сварных профилей для сельхозмашиностроения: Учебник / В.И. Стрижак, М.Ф. Ратников, И.М. Зубова 1984. – 60-61 с.
8. Перспективы производства холоднодеформированных профильных труб и основы современной технологии их изготовления: Учебник / А.И. Дорохов [та ін.] – М.: Металлургия, 1982. – 31-36 с.
9. Новая технология производства профильных труб высокой точности в линии трубоэлектросварочного агрегата / П.Н. Калинушкин, В.Б. Фурманов, В.М. Пинчук, Л.М. Шлоссберг // Прогрессивные технологии и оборудование для трубного производства: Сб. науч. тр. ВНИТИ. – М.: Металлургия, 1987. – С. 66–69.
10. <https://www.qform3d.com/>

REFERENCES

1. Stalnie trubi. Izgotovlenie, primenienie, sortament: Spravochnik / Yu.G. Gulyaev [ta in.] – Dnepropetrovsk: RIA «Dnepr-VAL» 2002. – 350 s.
2. Danchenko V.N. Proizvodstvo profilnikh trub / Danchenko V.N., Sergeev V.V., Nikulin E.V. -M.: Intermet Inzhiniring, 2003. -224s.
3. Boiarkin V. V., Remez O. A., Polshcha O.S. Matematychnе modeliuvannia protsesu profiliuvannia trub. Informatsiini tekhnolohii v metalurhii ta mashynobuduvanni – ITMM2023: tezy dop. mizhnarod. konf., m. Dnipro, 22 ber. 2023 r. / M-vo osvity i nauky Ukrainy, Ukrainyskyi derzhavnyi universytet nauky i tekhnolohii, Dnipro, 2023. S. 124 – 127.
4. Hordych, I., Herbst, S., Nürnberger, F., Boiarkin, V., Hubert, O., Maier, H.J. Manufacturing and Virtual Design to Tailor the Properties of Boron-Alloyed Steel Tubes(Book Chapter), Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics, Volume 93, 2020, Pages 21-44. ISSN: 16137736. DOI: 10.1007/978-3-030-38156-1_2

5. DSTU EN 10219-1:2006 Profili porozhnysti zvarni kholodnoho formuvannia z nelehovanykh i dribnozernystykh konstruktsiinykh stalei dlia metalokonstruktsii. Chastyna 1.
6. DSTU EN 10219-2:2006. Profili porozhnysti zvarni kholodnoho formuvannia z nelehovanykh i dribnozernystykh konstruktsiinykh stalei dlia metalokonstruktsii. Chastyna 2.
7. Strizhak V.I. Sravnitel'naya effektivnost proizvodstva profilnikh trub i zamknutikh svarnikh profilei dlia selkhoz mashinostroeniya: Uchebnik / V.I. Strizhak, M.F. Ratnikov, I.M. Zubova 1984. – 60-61 s.
8. Perspektivi proizvodstva kholodnodeformirovannikh profilnikh trub i osnovi sovremennoi tekhnologii ikh izgotovleniya: Uchebnik / A.I. Dorokhov [ta in.] – M.: Metallurgiya, 1982. – 31-36 s.
9. Novaya tekhnologiya proizvodstva profilnikh trub visokoi tochnosti v linii truboelektrosvarochnogo agregata / P.N. Kalinushkin, V.B. Furmanov, V.M. Pinchuk, L.M. Shlossberg // Progressivnie tekhnologii i oborudovanie dlia trubnogo proizvodstva: Sb. nauch. tr. VNITI. – M.: Metallurgiya, 1987. – S. 66–69.
10. <https://www.qform3d.com/>

Received 02.01.2023.

Accepted 19.02.2023.

UDC 621.774

V. Boiarkin, O. Remez, O. Polshcha

MATHEMATICAL MODELING OF THE FORMING OF SQUARE CROSS SECTION HOLLOW PROFILES

Steel alloys containing manganese and boron are increasingly being used in mechanical engineering, including automotive and agricultural sectors. Products of critical application made from such steels, including hollow ones, have a high level of mechanical properties, surface hardness, and wear resistance. These products are obtained by profiling of previously electrically welded round pipes with a hot sheet stamping or pressure treatment (drawing, cold rolling, stamping). Technological parameters of combined processing methods are often determined by the results of experimental research, which, due to the complexity and cost of materials, leads to significant expenses. The application of mathematical modeling can reduce the number of experiments and forecast the quality of finished products. The research focuses on investigating the possibility of obtaining square hollow profiles by means of push-pulling through one stand of a pipe welding unit and defining the requirements for geometric parameters of the billet.

Using the FEM finite elements method with QForm software, a model of the process of square hollow profiles forming in by pushing a non-driven four-roll stand was created. The possibility of providing a stable process at different values of the thickness of the billet is shown. It was determined that with an increase in the D/S (diameter/wall thickness) index of the billet for 19MnB4 steel hollow profiles, there is a reducing of pushing force. The obtained data described by an equation that can be used in engineering calculations. With

an increase in the D/S index of the billet for 19MnB4 steel hollow profiles, there is reducing of the relative wall thickening in the corner zones and increasing of the convexity of the profile sides.

Keywords: steel, profiling, metal forming, pushing, force, shape change.

Бояркін Вячеслав Володимирович, кандидат технічних наук, доцент кафедри обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова, Інститут промислових та бізнес технологій, Український державний університет науки і технологій. ORCID ID: 0009-0005-7582-9504. E-mail: v.v.boiarkin@ust.edu.ua.

Ремез Олег Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова, Інститут промислових та бізнес технологій, Український державний університет науки і технологій. ORCID ID: 0000-0002-5489-8798. E-mail: o.a.remez@ust.edu.ua.

Польща Олександр Станіславович, заступник директора ПП «Дніпро-Сервіс», м. Дніпро, Україна. E-mail: dniproservice.office@ukr.net.

Boiarkin Viacheslav, candidate of technical science, assistant professor, Department of Metal Forming, Institute of Industrial and Business Technologies, Ukrainian State university of Science and Technologies. ORCID ID: 0009-0005-7582-9504. E-mail: v.v.boiarkin@ust.edu.ua.

Oleh Remez, candidate of technical science, assistant professor, Department of Metal Forming, Institute of Industrial and Business Technologies, Ukrainian State university of Science and Technologies. ORCID ID: 0000-0002-5489-8798. E-mail: o.a.remez@ust.edu.ua.

Oleksandr Polshcha, deputy director private enterprise «Dnipro-Service», Dnipro, Ukraine. E-mail: dniproservice.office@ukr.net.

DOI: 10.34185/1991-7848.2023.01.02

УДК 621.762.666.03

М.П. Гадзира, Н.К. Давидчук, Я.Г. Тимошенко, М.О. Пінчук

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МОДИФІКУВАННЯ ВУГЛЕВМІСНИМИ ПОРОШКОВИМИ КОМПОЗИТАМИ НА СТРУКТУРУ ТА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ ЗАЛІЗА.

Анотація. Вивчено фазовий склад порошкових композицій (лігатур), утворених шляхом взаємодії нанорозмірних карбідів з порошковими металами. Досліджено особливості мікроструктури сплаву на основі заліза з додаванням розроблених лігатур та визначена їх твердість. Встановлено що, завдяки присутності нанорозмірних композитів в розплаві, формується високодисперсна структура з включеннями областей мікроевтектик, що забезпечують високу стійкість до абразивного зношування сплаву.

Ключові слова: карбід кремнію, карбід титану, карбід вольфраму, карбід хрому, магній, алюміній, титан, заліза, перлітна структура.

Постановка проблеми

Виробництво і застосування модифікаторів представляє складну науково-технічну проблему. Одним з основних її аспектів є розробка ефективних технологічних процесів їх виробництва, що забезпечують високий наскрізний витяг активних елементів з сировини. Не менш складною є розробка раціональних складів композитів, що забезпечують простоту, безпеку і економічність модифікування металу. Застосування високолегованих металевих сплавів з високими експлуатаційними властивостями часто стають не вигідними з-за їх високої вартості. Тому потрібно використовувати більш дешеві альтернативні матеріали, які не поступаються по своїм спеціальним властивостям металевим сплавам. Вискодисперсні композиційні порошкові матеріали, які містять в своєму складі карбідні та інші вуглевмісні сполуки можуть виконувати роль модифікаторів при створенні високоміцних та зносостійких сплавів на основі заліза. Проте детального вивчення їх впливу на

структуру та механічні властивості сплавів на основі заліза не проводилось вітчизняними дослідниками.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Однією із важливих проблем сучасної металургії є створення високоміцних, корозійностійких та зносостійких сплавів, шляхом прямого відновлення руди з наступним легуванням в електродугових печах. Значні резерви підвищення якості металу закладені в можливості активного та цілеспрямованого формування структури і властивостей шляхом введення в розплав в перед кристалізаційний період раціонально вибраних модифікаторів і легуючих добавок [1], [2], [3], [4]. Модифікування і легування металів є найбільш економічними і високоефективними методами впливу на формування структури відливок і придання металу підвищених експлуатаційних властивостей.

Мета дослідження. Метою даної роботи є розробка порошкових вуглевмісних композицій та використання їх як модифікаторів при сплавленні залізного порошку для покращення технологічних властивостей сплаву.

Викладення основного матеріалу дослідження

Методика експерименту

В якості вихідних компонентів синтезу вуглевмісних сполук шляхом взаємодії нанорозмірних карбідів з металами, використовували синтезовані в лабораторних умовах карбіди кремнію, хрому, титану і вольфраму, а також порошок магнію, дисперсні порошки алюмінію, титану та заліза.

Формування порошкових сумішей складу 50 карбіди – 50 Me (% (мас.)) проводили на планетарному млині «Санд» з твердосплавними кульками (WC-Co). Термічну обробку порошкових брикетів проводили в печі опору у вакуумі середнього ступеню (ДСТУ 2758-94). В процесі оптимізації була визначена температура нагріву для кожної системи окремо. Для взаємодії карбідів з магнієм -700 °С, з алюмінієм - 900°С, з титаном – 1000°С, з залізом - 1100 °С. Нагрів проводили зі швидкістю 50 °С/ хв, з наступною витримкою протягом 30 хвилин. Отримані зразки після

нагрівання подрібнювали та розмелювали протягом 30 хвилин в планетарному млині «Санд», після чого проводили рентгенографічний аналіз фазового складу кожної утвореної композиції. Рентгеноструктурний аналіз фазового складу продуктів взаємодії проводився на дифрактометрі ДРОН – УМ1 (CuK_α – випромінювання).

Приготування вихідних сумішей, для отримання металокомпозитів здійснювали аналогічно вище описаному методу змішування реакційних сумішей. Отримані 16 порошкових складів (10% лігатура 1-16 + 90%Fe), брикетували в таблетки в металевій прес-формі діаметром 30 мм.

Сплавлення зразків проводили на установці гарячого пресування СВД-120 при температурі 1750°C протягом 30 хвилин в середовищі аргону.

Мікроструктуру сформованих зразків на основі заліза досліджували за допомогою растрового електронного мікроскопу. Мікротвердість визначали на приборі ПМТ-3 при навантаженні 0,2 кг, а вимірювання твердості проводили по Вікерсу при навантаженні 5 кг.

Результати експерименту та їх обговорення

Аналіз даних рентгенографічного дослідження (табл.1) порошкових композицій (лігатури), утворених в системах: карбіди - магній, карбіди - алюміній, карбіди – титан, карбіди – залізо при різних температурах показав їх багатокомпонентний фазовий склад.

Згідно даних таблиці, утворені порошкові продукти містять складні сполуки карбідів, силіцидів, оксидів та інтерметалідів, а також певну кількість непрореагованих металів. Слід зазначити, що в складі кожної порошкової композиції ідентифікована фаза вільного вуглецю, утвореного з карбідів, ймовірно з анізотропною структурою скелетонного типу. Нова структурна форма вуглецю (CDC) зі структурами від аморфної до високо упорядкованої графітової природи, утворюється шляхом селективного видалення атомів металу або металоїду з кристалічного попередника – карбіду металу [5], [6].

Таблиця 1

Фазові склади утворених порошкових композицій (лігатур)

№ лігатури	Фазовий склад композиційного порошку, %
	Система - карбіди + магній
1	SiC, Mg, C_G, Mg ₂ Si, Si ₃ N ₄
2	TiC, Mg, C_G, (Ti,Mg) ₃ O ₅
3	WC, Mg, C_G, W ₂ C, W
4	Cr ₇ C ₃ , Mg, C_G, Cr ₃ C ₂ ,
	Система - карбіди + алюміній
5	SiC, Al, C_G, Si
6	TiC, Al, C_G, Al ₂ O ₃ , Ti ₃ AlC ₂
7	Al ₅ W, Al ₁₂ W, C_G,
8	Al ₈ Cr ₅ , Cr ₂ AlC, C_G
	Система - карбіди + титан
9	TiC, SiC, C_G, Ti ₅ Si ₃ , Ti ₃ SiC ₂ , 2,2Ti ₆ O
10	TiC, Ti ₂ O ₃ , C_G, Ti ₆ O
11	WC, W, TiC, C_G
12	Cr ₇ C ₃ , TiC
	Система - карбіди + залізо
13	SiC, Fe, Fe ₃ Si, C_G
14	TiC, TiO ₂ , C_G, Ti ₃ O ₅ , Fe
15	WC, Fe ₃ W ₃ C, C_G, WO ₃ , Fe
16	Cr ₇ C ₃ , (CrFe) ₇ C ₃ , Fe ₃ O ₄ , C_G

Порошок заліза марки ПЖР (середній розмір частинок 100-150 мкм) та синтезовані дисперсні порошкові лігатури, утворені взаємодією нанорозмірних карбідів кремнію, хрому, титану, вольфраму з магнієм, алюмінієм, титаном та залізом використовували в якості вихідних компонентів для формування композитів на основі заліза. З метою встановлення закономірності їх впливу на структуроутворення та зміцнення металокомпозитів дотримувались одного співвідношення: до порошку заліза марки ПЖР (середній розмір частинок 100-150 мкм) додавали 10% всіх розроблених лігатур.

Вивчення зображень мікроструктури сформованих композитів показали, що характерною особливістю їх є прояв смугастого контрасту на зображеннях травлених поверхонь зразків в растровому мікроскопі (рис. 1). Товщина

яскравих смуг, що уособлюють ідентифікацію високодисперсної перлітної структури не перевищує 0,5 мкм.

Крім того, важливою ознакою є також прояв на мікрофотографіях областей мікроевтектик з ледебуритною структурою (рис. 2). Розмір таких областей складає від 10 до 30 мкм. Також спостерігається їх рівномірний розподіл по всьому об'єму зразків.

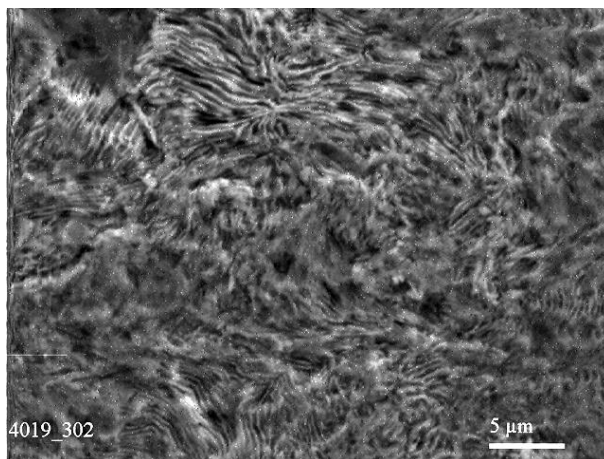


Рисунок 1 - Типовий фрагмент мікроструктури композитів на основі заліза, утворений з додаванням синтезованих вуглевмісних сполук

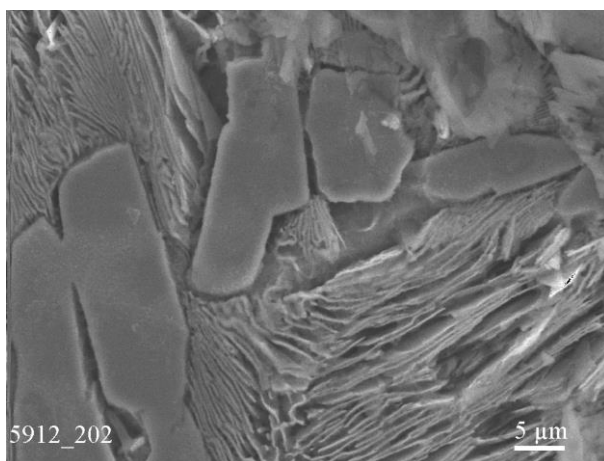


Рисунок 2 – Типовий фрагмент мікроструктури композитів на основі заліза, утворений з додаванням синтезованих вуглевмісних сполук, що сприяють утворенню мікроевтектик

Іншою характерною ознакою мікроструктури досліджуваних композитів є прояв смугастої структури разом з евтектичними

подовгуватими утвореннями, що розміщуються переважно по границям дисперсних зерен . Товщина таких евтектик не перевищує 1,0-1,5 мкм, а їх розгалужена довжина складає до 100 мкм (рис.3).

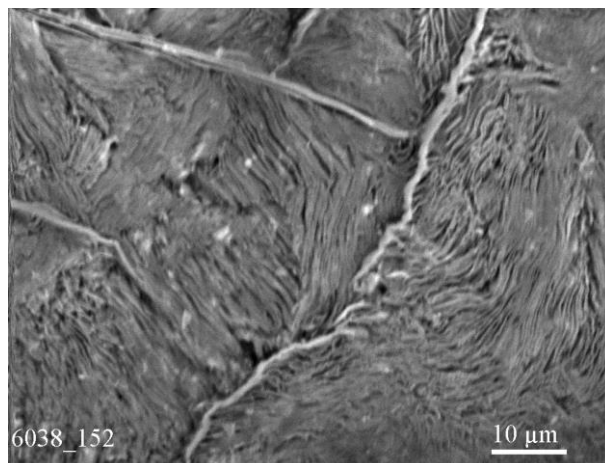


Рисунок 3 - Типовий фрагмент мікроструктури композитів на основі заліза, утворений з додаванням синтезованих вуглевмісних сполук, що сприяють утворенню видовжених евтектичних утворень по границях зерен

Дослідження мікротвердості та твердості (табл.2) виявили деяку розбіжність результатів як для всіх складів, так і між показниками твердості і мікротвердості, які свідчать про незначну мікропоруватість сформованої структури. Найкращі значення були досягнуті при використанні високодисперсних вуглевмісних сполук, що синтезувались в системах нанодисперсний карбід-магній та нанодисперсний карбід-титан. Найнижчі показники пов'язані з використанням синтезованої лігатури в системі нанодисперсний карбід-залізо.

З метою покращення показників твердості в процесі експерименту для сплавлення металу використовували вакуумну електродугову піч. Зразками для дослідження вибрали зразки з додаванням лігатури на основі алюмінію. В умовах такого розплаву відбувається більш досконале структуроутворення без впливу домішок оксидних фаз. Однак, це не призводить до зникнення мікропоруватості структури, так як видно із таблиці 3, різниця між показниками мікротвердості та твердості є помітною, а також не спостерігається, покращення результатів твердості.

Таблиця 2

Мікротвердість та твердість сплавлених при температурі 1750 °С зразків на основі заліза з додаванням синтезованих високодисперсних вуглевмісних сполук-лігатур

№п/п	Склад вихідних сумішей, % (мас.)	Мікротвердість HV _{0,2} , ГПа	Твердість HV _{0,5} , ГПа
1	10% лігатура 1 + 90% Fe	4,4	4,2
2	10% лігатура 2 + 90% Fe	4,4	4,1
3	10% лігатура 3 + 90% Fe	4,5	4,5
4	10% лігатура 4 + 90% Fe	4,7	4,5
5	10% лігатура 5 + 90% Fe	3,9	3,8
6	10% лігатура 6 + 90% Fe	4,3	4,2
7	10% лігатура 7 + 90% Fe	5,9	4,9
8	10% лігатура 8 + 90% Fe	6,1	5,6
9	10% лігатура 9 + 90% Fe	6,0	5,2
10	10% лігатура 10 + 90% Fe	5,0	4,2
11	10% лігатура 11 + 90% Fe	5,8	4,6
12	10% лігатура 12 + 90% Fe	5,3	4,8
13	10% лігатура 13 + 90% Fe	4,7	3,8
14	10% лігатура 14 + 90% Fe	4,2	3,6
15	10% лігатура 15 + 90% Fe	4,3	3,6
16	10% лігатура 16 + 90% Fe	4,2	3,5

Таблиця 3

Мікротвердість та твердість композитів на основі заліза,
одержаних дуговою плавкою з додаванням синтезованих
високодисперсних вуглевмісних сполук-лігатур на основі алюмінію

№ п/п	Склад вихідних сумішей, % (мас.)	Мікротвердість, HV _{0,2} , ГПа	Твердість HV _{0,5} , ГПа
1	10% лігатура 5 - 90% Fe	5,9	5,5
2	10% лігатура 6 - 90% Fe	4,1	3,7
3	10% лігатура 7 - 90% Fe	4,2	3,5
4	10% лігатура 8 - 90% Fe	3,9	3,4

Трибологічні дослідження отриманих сплавів визначали при сухому терті, використовуючи наступні умови:

- швидкість ковзання – 1 м/с.;
- навантаження – 2 кг;
- матеріал контртіла (КТ) – абразивний круг (АСВ 160/125);
- схема контакту – вал (АСВ 160/125) – площа (зразок);

– загальний шлях сухого тертя – 1000 м (16') (тертя на повітрі при кімнатній температурі).

Результати випробувань представлені в табл.4.

Таблиця 4

Характеристики трибологічних досліджень композитів на основі заліза, сформованих з участю синтезованих високодисперсних вуглевмісних сполук-лігатур

№ п/п	Склад, % (мас.)	Лінійне зношування зразка, I, (мкм/км)	Масове зношування зразка, I, (мг/км)
1	10 лігатура 1* – 90 Fe	242,3	23,0
2	10 лігатура 2* – 90 Fe	251,6	26,4
3	10 лігатура 3* – 90Fe	230,0	22,0
4	10 лігатура 4* – 90 Fe	216,0	19,8
5	10 лігатура 5* – 90 Fe	246,3	17,6
6	10 лігатура 6* – 90 Fe	150,1	15,3
7	10 лігатура 7* – 90 Fe	190,5	19,0
8	10 лігатура 8* – 90Fe	196,3	20,3
9	10 лігатура 9* – 90 Fe	138,6	18,5
	Чавун сірий	325,0	58,8

Лігатура утворена в системах:

1*-(50TiC-50Mg), 2*-(50WC-50Mg), 3*-(50Cr₇C₃-50Mg), 4*-(50TiC-50Al),
5*-(50SiC-50Al), 6*-(50SiC-TiH₂), 7*-(50WC-50 TiH₂), 8*-(50Cr₇C₃-50TiH₂)
9*-(50SiC-50Fe)

Для досягнення високих значень зносостійкості доцільним було проведення традиційного гартування та дослідження трибологічних характеристик тих же самих зразків в порівнянні з відомими зносостійкими матеріалами, що широко використовуються на практиці. Нагрівання зразків проводили в резистивній печі на повітрі до температури 850 °С. Гартування здійснювали у воді. Термічну обробку після гартування не проводили.

Результати дослідження, представлені в таблиці 5 показали, що проведене гартування без традиційних наступних термообробок таких як відпал та нормалізація суттєво призводить до покращення трибологічних характеристик.

Таблиця 5

Характеристики трибологічних досліджень загартованих композитів
на основі заліза, сформованих з участю синтезованих високодисперсних
вуглевісних сполук-лігатур після гартування

№ п/п	Склад, % (мас.)	Масове зношування зразка, I, (мг/км)	Твердість, HV _{5.0} , ГПа
1	10 лігатура 1* – 90 Fe	11,0	9,1
2	10 лігатура 2* – 90 Fe	5,9	8,3
3	10 лігатура 3* – 90Fe	5,6	7,9
4	10 лігатура 4* – 90 Fe	5,7	8,7
5	10 лігатура 5* – 90 Fe	25,0	3,2
6	10 лігатура 6* – 90 Fe	6,3	7,6
7	10 лігатура 7* – 90 Fe	6,8	7,5
8	10 лігатура 8* – 90Fe	3,8	7,5
9	10 лігатура 9* – 90 Fe	3,6	7,5
10	Хромонікелевий чавун QT-10	6.3	7,0
11	Хромонікелевий чавун QT-20	19.7	6,4

Стійкість до абразивного зношування в умовах сухого тертя переважає характеристики хромонікелевого чавуну марки QT-10 більше ніж на 40 %, а по відношенню до чавуну марки QT-20 – майже у 3 рази. Такі відмінності спричинені створенням сприятливої до високої абразивної стійкості структури, що утворюється при сплавленні та в процесі фазових перетворень при гартуванні.

В цілому мікроструктура композитів після гартування характеризується проявом мартенситу голкового типу, розміри якого значно менші 0,5 мкм (рис.4). Розміри елементів евтектик знаходяться в межах 1-5 мкм. В процесі гартування фазові перетворення впливають також на перегруповування структури евтектичних областей.

Найбільш стійким до абразивного зношування серед досліджених зразків виявився зразок № 9, що був сплавлений з додаванням лігатури, утвореної в системі 9*-(50SiC-50Fe). Мікроскопічні дослідження такого зразка після гартування показали його високу однорідність та формування нанорозмірної перлітної структури в межах феритних зерен за розміром не більше 5 мкм з мартенситними утвореннями голкового типу.

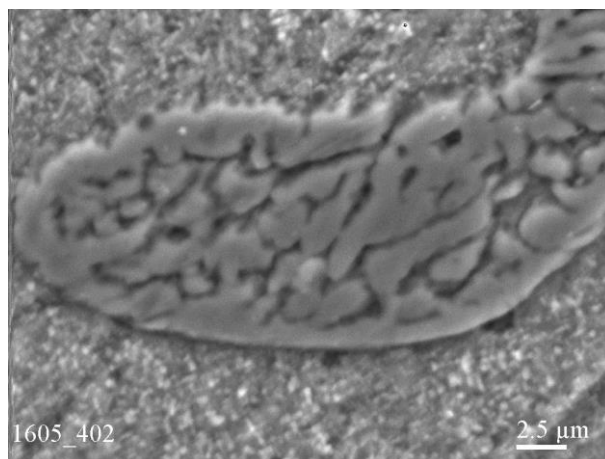


Рисунок 4 - Типовий фрагмент мікроструктури композиту на основі заліза, утвореного з участю синтезованих високодисперсних вуглевмісних сполук-лігатур, що характеризуються наявністю евтектичних мікрообластей

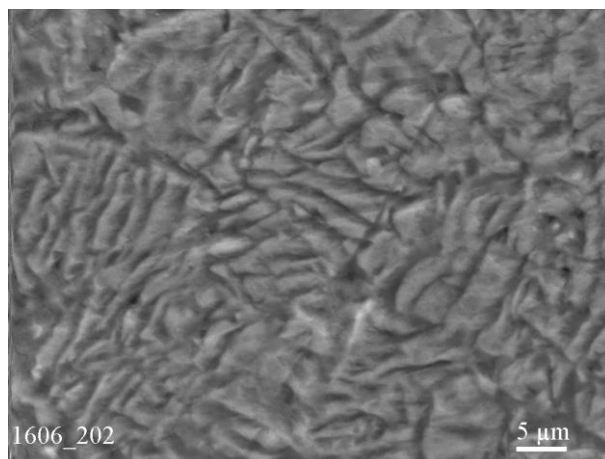


Рисунок 5 - Фрагмент мікроструктури композиту на основі заліза, утвореного з участю синтезованих високодисперсних вуглевмісних сполук-лігатур, що характеризуються найкращою стійкістю до абразивного зношування

В більшості випадків реалізується як при сплавленні, так і в процесі термічної обробки матрична перлітна структура (рис.6), що проявляється на мікроскопічних зображеннях чередуванням світних і темних смуг. Довжина та товщина таких смуг залежить від типу використаних в якості лігатури синтезованих високодисперсних вуглецевих сполук, утворених взаємодією нанорозмірних карбідів з порошковими металами.

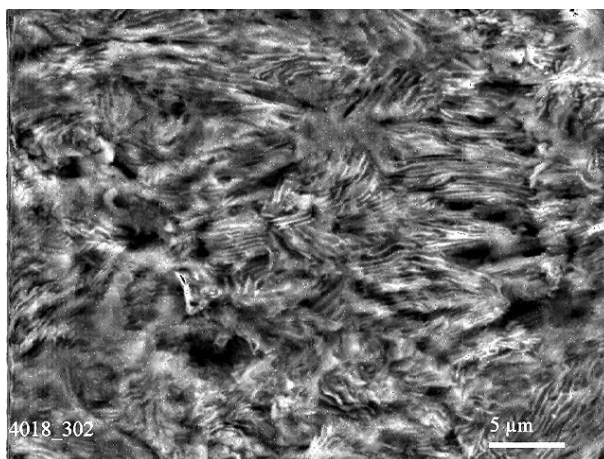


Рисунок 6 – Фрагмент мікроструктури композиту на основі заліза, утвореного з участю синтезованих високодисперсних вуглевмісних сполук-лігатур, що характеризуються однорідною наноструктурованою перлітною структурою

Висновки

1. Рентгенографічний аналіз синтезованих високодисперсних вуглевмісних сполук виявив їх складний структурний стан, що зумовлений впливом атомів середовища та формоутворенням багатокомпонентних фаз твердих розчинів.

2. Сплавлення порошкових сумішей порошкового заліза з синтезованими вуглевмісними продуктами призводить до формування перлітної структури металокомпозитів, а також областей мікроевтектик з ледебуритною структурою що характеризуються дисперсним розміром зерен і високодисперсними включеннями карбідів.

3. Загартування створених металокомпозитів на основі заліза призводить до значного зростання зносостійкості, що перевершує показники широковідомих зносостійких марок чавуну та сталі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Рябчиков И.В., Панов А.Г., Корниенко А.Э. Модификаторы для обработки стали: Сб. докладов Литейного консилиума №2 «Теория и практика металлургических процессов при производстве отливок из чёрных сплавов» / И.В. Рябчиков, А.Г. Панов, А.Э. Корниенко. – Челябинск: Челябинский Дом печати, 2007. - 66 с.
2. Гольдштейн Я. Е., Мизин В.Г. Модифицирование и микролегирование чугуна и стали / Я. Е. Гольдштейн, В.Г. Мизин. – М.: Металлургия, 1986. - 272 с.
3. Андреев И.Д., Афонаскин А.В., Бажова Г.Ю., Дородный В.Д. Влияние технологических параметров модифицирования комплексными модификаторами на свойства отливок / И.Д. Андреев, А.В. Афонаскин, Г.Ю. Бажова, В.Д. Дородный // Литейное производство. – 2002, - №6. – С.13-15.

4. Шуб Л.Г., Ахмадеев А.Ю. О целесообразности модифицирования стального лиття: Сб. докладов Литейного консилиума №1 «Модифицирование как эффективный метод повышения качества чугунов и сталей» / Л.Г. Шуб, А.Ю. Ахмадеев. - Челябинск: Челябинский Дом печати, 2006 – 15 с.
5. Presser V. Heon M., Gogotsi Y. Carbide-Derived Carbons – From Porous Networks to Nanotubes and Graphene / V. Presser, M. Heon, Y. Gogotsi // *Advanced Functional Materials*. – 2011. – Vol. 21, № 5. – P. 810–833.
6. Yushin G. Nikitin A., Gogotsi Y. ed. In *Carbon Nanomaterials* / G. Yushin, A. Nikitin, Y. Gogotsi ed. // CRC Taylor and Francis. – 2006. – P. 211–254.

REFERENCES

1. Ryabchikov I.V., Panov A.G., Kornienko A.E. *Modifikatory dlya obrabotki stali: Sb. dokladov Liteynogo konsiliuma №2 «Teoriya i praktika metallurgicheskikh procesov pri proizvodstve otlivok iz chernykh splavov»* / I.V. Ryabchikov, A.G. Panov, A.E. Kornienko. – Chelyabinsk: Chelyabinskiy Dom pechaty, 2007. - 66 p. (in Russian)
2. Goldshteyn Ya. E., Mizin V.G. *Modificirovanie i mikrolegirovanie chuguna i stali* / Ya. E. Goldshteyn., V.G. Mizin. – Moskov: Metallurgiya, 1986. - 272 p. (in Russian)
3. Andreev I.D., Afonaskin A.V., Bajanova G.Yu., Dorodnyy V.D. *Vliyanie technologicheskikh parametrov modificirovaniya kompleksnymi modifikatorami na svoystva otlivok* / I.D. Andreev, A.V. Afonaskin, G.Yu. Bajanova, V.D. Dorodnyy // *Liteynoe proizvodstvo*. – 2002, - №6. – P.13-15.
4. Shub L.G., Ahmadeev A.Yu. *O celeobraznosti modificirovaniya stalnogo litya: Sb. dokladov Liteynogo konsiliuma №1 «Modificirovanie kak effektivnyy metod povysheniya kachestva chugunov i staley»* / L.G. Shub, A.Yu. Ahmadeev. - Chelyabinsk: Chelyabinskiy Dom pechaty, 2006 – 15 p. (in Russian)
5. Presser V. Carbide-Derived Carbons – From Porous Networks to Nanotubes and Graphene / V. Presser, M. Heon, Y. Gogotsi // *Advanced Functional Materials*. – 2011. – Vol. 21, № 5. – P. 810–833.
6. Yushin G. In *Carbon Nanomaterials* / G. Yushin, A. Nikitin, Y. Gogotsi ed. // CRC Taylor and Francis. – 2006. – P. 211–254.

Received 06.01.2023.

Accepted 08.02.2023.

UDK 621.762.666.03

M. Gadzyra, N. Davydochuk, Ya. Tymoshenko, M. Pinchuk

STUDY OF THE INFLUENCE OF MODIFICATION WITH CARBON-CONTAINING POWDER COMPOSITES ON THE STRUCTURE AND WEAR RESISTANCE OF IRON-BASED ALLOYS

Highly dispersed composite powder materials that contain carbide and other carbonaceous compounds can act as modifiers in the creation of high-strength and wear-resistant iron-based alloys. However, a detailed study of their influence on the structure and mechanical properties of iron-based alloys was not conducted by domestic researchers. The phase composition of powder compositions (ligatures) formed by the interaction of nanosized carbides with powdered metals was studied. X-ray analysis of the synthesized highly dispersed carbon-containing compounds revealed their complex

structural state caused by the influence of environmental atoms and the formation of multicomponent phases of solid solutions. The peculiarities of the microstructure of the iron-based alloy with the addition of developed ligatures were studied and their hardness was determined. The fusion of powder mixtures of powdered iron with synthesized carbon-containing products leads to the formation of a pearlite structure of metal composites, as well as areas of microeutectics with a ledeburite structure, characterized by a dispersed grain size and highly dispersed inclusions of carbides, which provide high resistance to abrasive wear of the alloy. Hardening of the created iron-based metal composites leads to a significant increase in wear resistance, which exceeds the indicators of well-known wear-resistant brands of cast iron and steel.

Keywords: silicon carbide, titanium carbide, tungsten carbide, chromium carbide, magnesium, aluminum, titanium, iron, pearlite structure.

Гадзиря Микола Пилипович, д.т.н., с.н.с. Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАНУ.

Давидчук Надія Костянтинівна, к.т.н., с.н.с. Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАНУ

Тимошенко Ярослав Григорович, к.т.н., с.н.с. Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАНУ.

Пінчук Микита Олександрович, м.н.с. Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАНУ.

Gadzyra Mykola, Doctor of Technical Sciences, senior researcher, Frantsevich Institute for Problems of Materials Sciences, NAS of Ukraine

Davydchuk Nadiya, Ph.D., senior researcher, Frantsevich Institute for Problems of Materials Sciences, NAS of Ukraine

Tymoshenko Yaroslav, Ph.D., senior researcher, Frantsevich Institute for Problems of Materials Sciences, NAS of Ukraine

Pinchuk Mykyta, junior researcher Frantsevich Institute for Problems of Materials Sciences, NAS of Ukraine.

DOI: 10.34185/1991-7848.2023.01.03

УДК 669.184.14

Т.С. Голуб, Л.С. Молчанов, С.І. Семикін

**ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ РОЗЧИНЕННЯ
НІТРОГЕНУ В ЗАЛІЗО-ВУГЛЕЦЕВОМУ РОЗПЛАВІ
ПРИ РІЗНИХ КОНЦЕНТРАЦІЯХ ДОМІШОК**

***Анотація.** Шляхом проведених термодинамічних розрахунків проведено оцінку ефективності розчинення нітрогену в залізовуглецевому розплаві при додатковому введенні титану, хрому та алюмінію. Введення хрому у розплав в кількості 0,25-0,05%мас позитивно відображається на розчинності нітрогену у залізовуглецевому розплаві незалежно від вмісту вуглецю, дозволяючи збільшити вміст нітрогену у 32 - 46 рази у порівнянні зі стандартними умовами. Алюміній додатково введений у розплав негативно впливає на вміст нітрогену, знижуючи його кількість навіть при малій кількості введення. Введення титану у розплав є найбільш позитивним при низькому вмісту вуглецю і дозволяє збільшити розчинності нітрогену у 1,0-1,33 рази при вмісті титану від 0,05 до 0,25 %мас. відповідно.*

***Ключові слова:** залізо-вуглецевий розплав, нітроген, хром, алюміній, титан, розчинення.*

Постановка проблеми

В сучасних умовах значно підвищуються вимоги до службових властивостей металовиробів та зокрема до сталей з яких вони виготовлені. При цьому одним з засобів підвищення їх механічних властивостей є проведення нітридного зміцнення, ефективність якого на пряму залежить від інтенсивності процесів розчинення нітрогену у розплаві. При цьому в сталі паралельно з введенням нітрогену проводять легування нітридоутворюючими елементами (титан, хром та алюміній). При цьому значний інтерес представляє визначення функціональної залежності ефективності процесів розчинення та насичення розплаву нітрогеном від вмісту інших домішок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Нітроген, як й нікель та вуглець, розширює γ ділянку діаграми стану Fe-C впливаючи на механічні властивості сталей. У зв'язку з цим вплив нітрогену є значно сильнішим. Так легування нітрогеном нержавіючих сталей дозволяє зменшити в них вміст нікелю та марганцю в 1,5 – 2 рази, а в деяких випадках взагалі виключити ці елементи при одночасному збереженні службових властивостей на одному рівні. Так вміст 0,15 % нітрогену в хромо-нікелевих сталях відповідає 2 - 4 % нікелю, а 0,25% нітрогену – 2,5 - 6% нікелю [1]. Таким чином, нержавіючі сталі, леговані нітрогеном, перевершують за міцністю, в'язкістю та корозійною стійкістю традиційні нержавіючі сталі. Так леговані нітрогеном безнікелеві сталі, що застосовуються в медицині для виготовлення хірургічного інструменту та імплантатів мають підвищену міцність, зносостійкість і не викликають негативних явищ і алергічних реакцій в людському організмі [2 - 4]. Нержавіючі мартенситні та феритні сталі, леговані нітрогеном, при відповідній термічній і термопластичній обробці мають підвищену міцність, корозійну стійкість і поліпшену технологічну пластичність при високих і низьких температурах [5]. Легування швидкоріжучих сталей нітрогеном (P9, P6M5) дозволяє значно підвищити стійкість інструмента, у тому числі, й червоноломкість, що обумовлено подрібненням структури та утворення нітридів [2 - 6].

Мета дослідження

Виходячи з наведеної вище інформації, дослідження впливу різних компонентів залізовуглецевого розплаву на розчинність і засвоєння нітрогену є досить важливим та актуальним питанням. Не дивлячись на велику кількість вже виконаних у цьому напрямку досліджень, ще є досить великий обсяг недосліджених питань, зокрема і вплив на процеси насичення розплаву нітрогеном вмісту вуглецю, алюмінію, хрому та титану.

Основний матеріал дослідження

Агрегатний стан нітрогену при кімнатній температурі й вище – газоподібний, тому легування нітрогеном має свої особливості. При виплавці

сталей у звичайних металургійних агрегатах верхня межа розчинності нітрогену обумовлена стандартною розчинністю нітрогену у сталі при температурі ліквідус. Процес розчинення нітрогену в рідкому залізі зазвичай представляють реакцією [5]:

$$[N] = K_N \quad (1)$$

де $[N]$ – розчинність нітрогену в залізі при даному парційному тискові P_{N_2} ;

K_N константа реакції, чисельне значення якої залежить від температури й способів виразу концентрації.

В.В. Аверін описав константу рівноваги за рівнянням [4]:

$$\lg KN = \lg \frac{a[N]}{P_{N_2}^{1/2}} = -\frac{364}{T} - 1,144 \quad (2)$$

Для визначення розчинності нітрогену у рідкому залізі до температури 2650°C авторами [5-7] пропонується рівняння:

$$\lg[N] = (-850/T) - 0,905 + 0,5 \lg P_{N_2} \quad (3)$$

з якого витікає, що при $T = 1873$ °K та $P_{N_2} = 1$ атм $[N] = 0,044\%$.

Нітроген може утворювати із залізом дві сполуки Fe_4N (9,9% N) та Fe_2N (11,5% N). Fe_2N починає розкладатися за температури ~550 °C. При подальшому підвищенні температури починає дисоціювати і Fe_4N .

Ентальпія розчинення нітрогену в рідкому залізі (ΔH_N) являє собою різницю двох протилежних за знаком величин: ентальпії дисоціації молекулярного азоту на атоми ($\Delta H_{дис}$) та ентальпії розчинення атомарного азоту в рідкому залізі (ΔH_p). Перший процес є ендотермічним, а другий – екзотермічним. Оскільки $\Delta H_{дис} > \Delta H_p$, процес, описаний рівнянням (1), протікає з поглинанням тепла. Автори роботи [5] описали розчинність азоту в рідкому залізі двома наступними рівняннями:

$$\text{при } T < 1973K: \lg[N] = -\frac{560}{T} - 1,06 \quad (4)$$

$$\text{при } T > 1973K: \lg[N] = -\frac{1100}{T} - 0,79 \quad (5)$$

Таким чином, ентальпія розчинення азоту в рідкому залізі до 1973 К - 10700 Дж/моль, а вище 1973 К - 21000 Дж/моль. При розчиненні нітрогену навіть при $P_{N_2} > 1 \text{ атм}$ самотійна нітридна фаза не утворюється. Утворення нітридів типу Fe_2N та Fe_4N спостерігалось лише у твердому металі у температурному інтервалі існування аустеніту.

Присутність домішок впливає на швидкість розчинення азоту в металі. Так, зі збільшенням концентрації кисню в металі від 0,067 до 0,144% час досягнення рівноважної концентрації збільшується з 1,5 до 3,0 годин. Відзначено й аналогічний вплив сірки: при її концентраціях 0,49 та 0,87% та тиску азоту 0,1 МПа час досягнення рівноважної концентрації зростає до 3,0 та 6,0 годин відповідно. Загалом, присутність таких елементів у залізо-вуглецевому розплаві, як вуглець, кремній, сірка та алюміній при температурах 1300 – 1600 °С значно знижують розчинність нітрогену у металі [8 - 10]. А присутність марганцю, навпаки, підвищує розчинність [9 - 11].

Загалом коефіцієнт активності для невисоких концентрації домішок чи легуючих елементів можна знайти за законом Вагнера [7]

$$\lg f_N = \sum_n e_N^X [\%X] \quad (6)$$

де e_N^X – параметри взаємодії першого порядку; X – частка компоненту у розплаві, %; n – кількість легуючих елементів.

Для випадку високого вмісту легуючих компонентів у рідкому залізі, для більш точного розрахунку їх впливу на коефіцієнт активності розчиненого нітрогену, необхідно використовувати також параметри взаємодії другого порядку (r_N^X). Тоді коефіцієнт активності нітрогену у складному розплаві на основі заліза визначається:

$$\lg f_N = \sum_n e_N^X [\%X] + \sum_n r_N^X [\%X]^2 + \sum_X \sum_E r_N^{X,E} [\%X] [\%E] \quad (7)$$

Для розрахунку значень коефіцієнта активності нітрогену при температурі, що відрізняється від 1600 °С, можна використовувати рівняння, що отримано Чипманом та Корриганом [4]:

$$\lg fN(T) = \left(\frac{3280}{T} - 0,75\right) \lg fN(1873) \quad (8)$$

Або рівняння, що отримано Нельсоном для температур 1200-1900°C:

$$\lg fN(T) = \frac{1872}{T} \left[\sum e_N^X [\%X] \right]_{1873} \quad (9)$$

Таким чином, загальний вираз для розрахунку розчинності нітрогену у складному розплаві на основі заліза має вигляд:

$$\lg [\%N] = -\frac{364}{T} - 1,144 + 0,5 \lg P_{N_2} - \frac{1873}{T} \left[\sum e_N^X [\%X] \right]_{1873} \quad (10)$$

Введення нітрогену у залізовуглецевий розплав можливо двома шляхами: через тверду фазу із феросплавами чи іншими лігатурами, або через газоподібну фазу шляхом продувки розплаву газоподібним нітрогеном. В умовах зазначеного дослідження, проведений розрахунок розчинності нітрогену із газоподібного стану у залізовуглецевому розплаві при різному вмісті вуглецю для трьох типів розплавів із середнім вмістом компонентів, %мас: А) С $\leq 0,2$; S $\leq 0,06$; P $\leq 0,07$; Б) С 0,42-0,5; Si 0,17-0,37; Mn 0,5-0,8; P $\leq 0,03$; S $\leq 0,035$; Cr $\leq 0,25$; Ni $\leq 0,3$; Cu $\leq 0,3$; В) С 0,9-1,09; Si 0,17-0,33; Mn 0,17-0,33; P $\leq 0,03$; S $\leq 0,028$; Cr $\leq 0,2$; Ni $\leq 0,25$; Cu $\leq 0,25$ показав наступне.

За результатами термодинамічних розрахунків встановлено, що розрахунково можлива концентрація нітрогену при розчиненні у залізовуглецевому розплаві відповідно до тиску газу нітрогену над розплавом має ступеневий характер (рис. 1, а).

Як було відмічено вище, підвищення вмісту вуглецю у залізовуглецевих розплавах значно знижує вміст розчиненого нітрогену (з 0,2 до 1%мас – у 1,3 рази) (рис. 1, б).

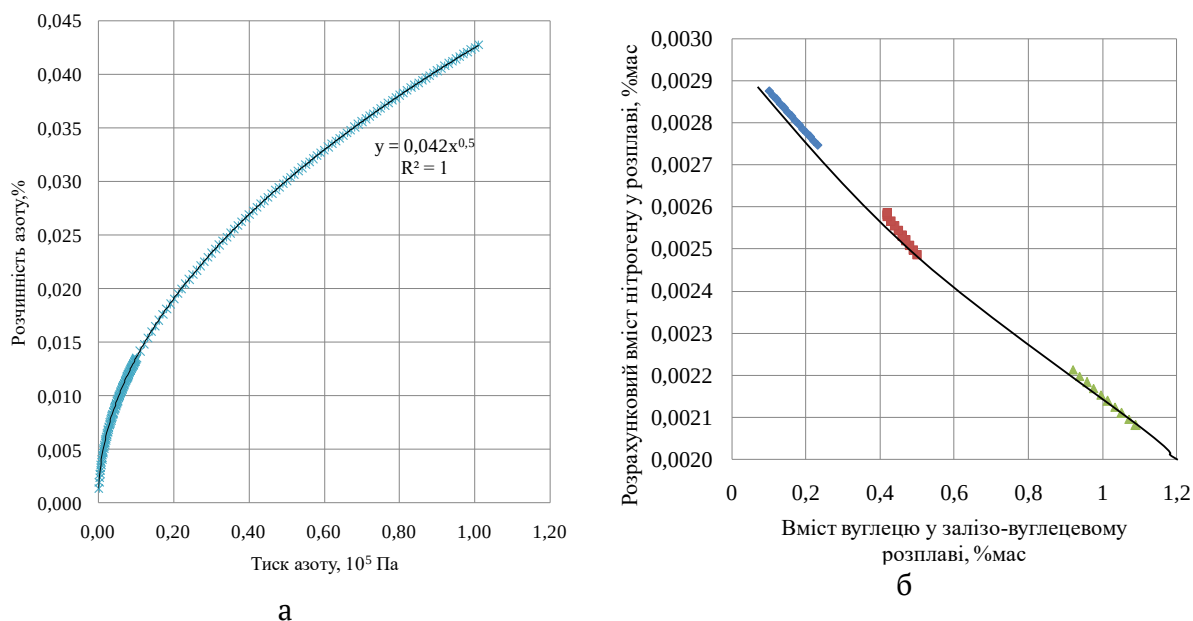


Рисунок 1 – Залежність кількості розчиненого нітрогену у розплаві від початкових умов: а - від тиску газоподібного нітрогену над розплавом; б - від вмісту вуглецю у трьох типах залізовуглецевих розплавів (відповідно до обраного у розрахунку хімічного складу)

Вплив додаткового введення у розплав хрому у кількості 0,25-0,05%мас позитивно відображається на розчинності нітрогену у трьох типах розплавів у порівнянні із розрахунком вмісту нітрогену відповідно до тиску над розплавом (рис. 2) , сприяючи збільшенню вмісту нітрогену на величину від 32 до 46 раз у порівнянні із показником розчинення відносно тиску нітрогену над розплавом. При цьому чим менший вміст вуглецю у розплаві, тим вищий вміст розрахункового розчиненого нітрогену у розплаві і тим краще проявляється приріст кількості доданого хрому до розплаву. Так у розплаві А збільшення вмісту хрому з 0,05 до 0,25 %мас відповідає приросту вмісту розчиненого нітрогену у 1,4 рази, для розплаву Б цей показник відповідає величині 1,12 раз, а для розплаву В – тільки 1,06 раз майже незалежно від тиску газу над розплавом.

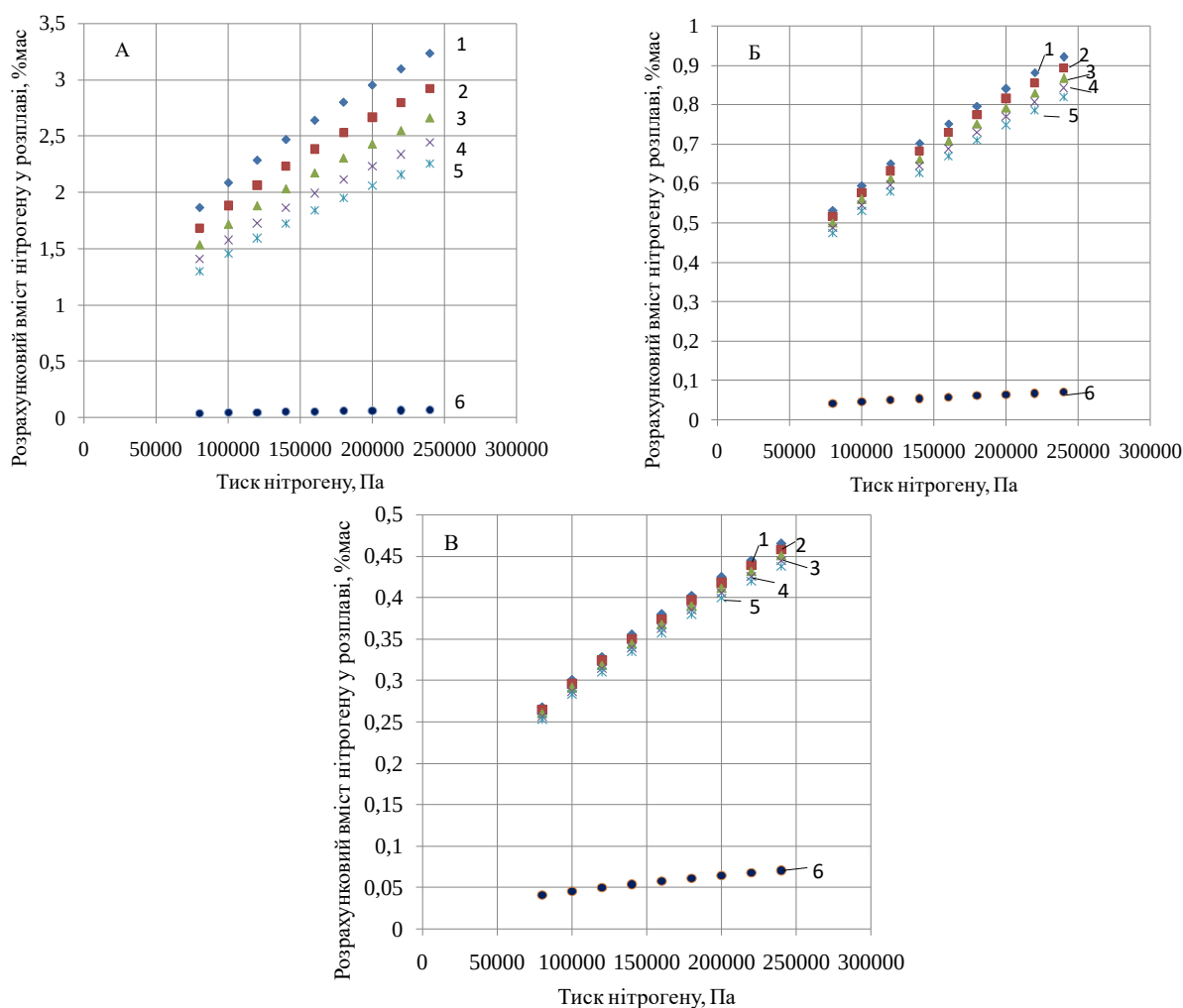


Рисунок 2 – Залежність вмісту розчиненого нітрогену у розплаві від його тиску для розплавів А-В відповідно до позначених у тексті варіантів при вмісті хрому 0,25-0,05 %мас (поділка 0,05 %), що відповідає варіантам 1 – 5 у порівнянні із залежністю розчинення нітрогену при відповідному тискові газу над розплавом 6

Проведений термодинамічний аналіз з визначення впливу кількості алюмінію на вміст нітрогену у розплаві показав, що алюміній негативно впливає на розчинність нітрогену, навіть, при малих концентраціях (рис. 3). Зазначена особливість найбільше проявляється при збільшенні вмісту вуглецю у розплаві. Так додавання алюмінію у кількості 0,05 – 0,25 %мас до розплаву А майже не впливає на розчинність нітрогену. А для розплавів Б та В відмічено зниження розрахункової розчинності нітрогену у розплавах на величину у 1,1 та 1,3 рази відповідно. При цьому для проаналізованого діапазону вмісту алюмінію отримані величини розчинення нітрогену були майже однаковими для кожного з розглянутих варіантів.

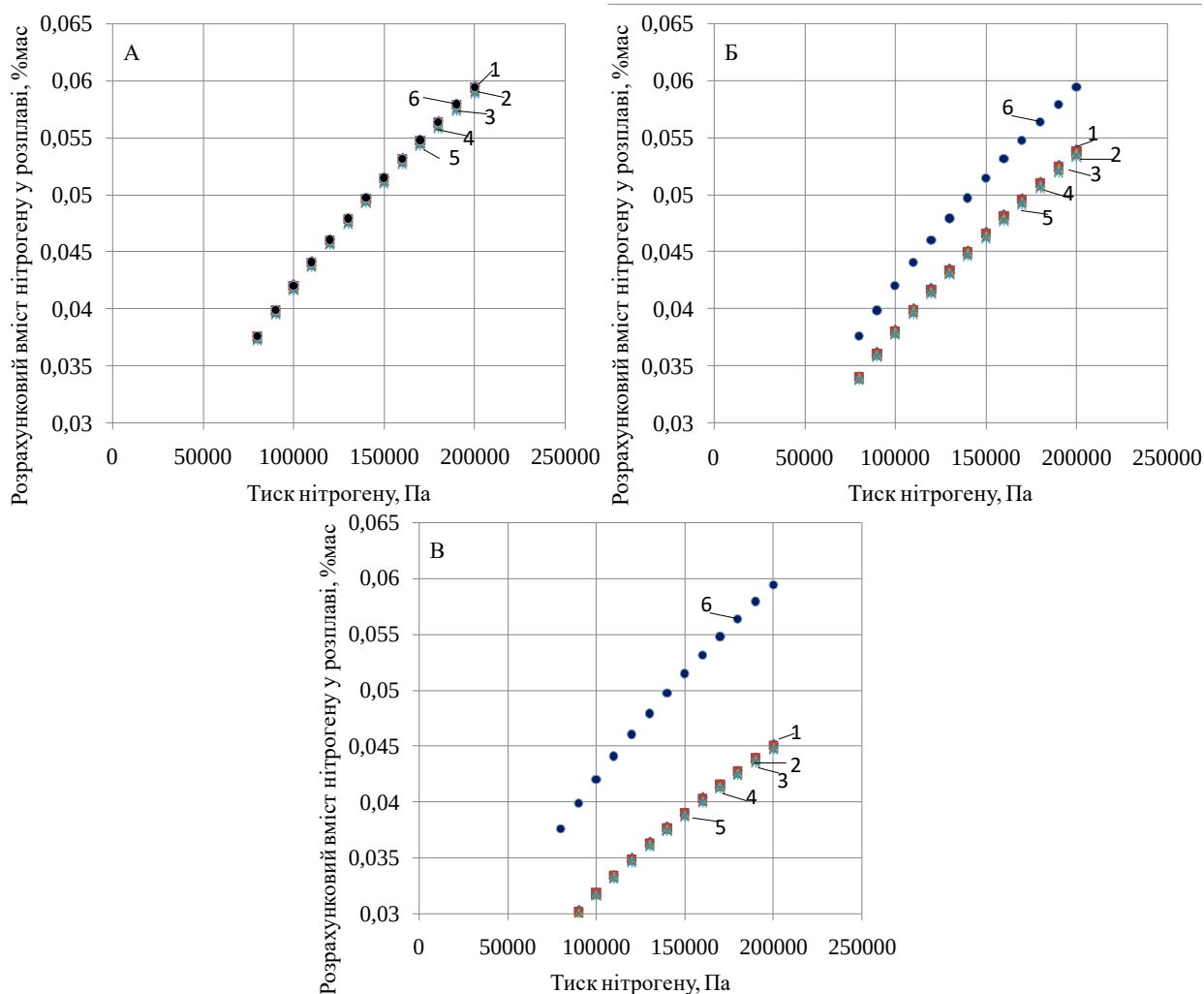


Рисунок 3 - Залежність вмісту розчиненого нітрогену у розплаві від його тиску для розплавів А-В відповідно до позначених у тексті варіантів при вмісті алюмінію 0,25-0,05 %мас (поділка 0,05 %), що відповідає варіантам 1 – 5 у порівнянні із залежністю розчинення нітрогену при відповідному тискові газу над розплавом 6

Аналіз можливого впливу доданого до залізовуглецевого розплаву титану на розчинність нітрогену показав, що найбільше позитивний вплив проявляється при низькому вмісті вуглецю (підвищення розчинності у 1,0-1,33 рази при вмісті титану від 0,05 до 0,25 %мас. відповідно (рис. 4). При підвищенні вмісту вуглецю до 0,45 %мас. додавання титану позитивно проявляється тільки при кількості більше 0,1%мас. (у 1,0-0-1,27 рази). При більшому вмісті вуглецю розчинність нітрогену при введенні титану підвищується тільки при його кількості 0,25% мас. При нижчій кількості спостерігається тільки вплив вуглецю (зниження розчинності нітрогену).

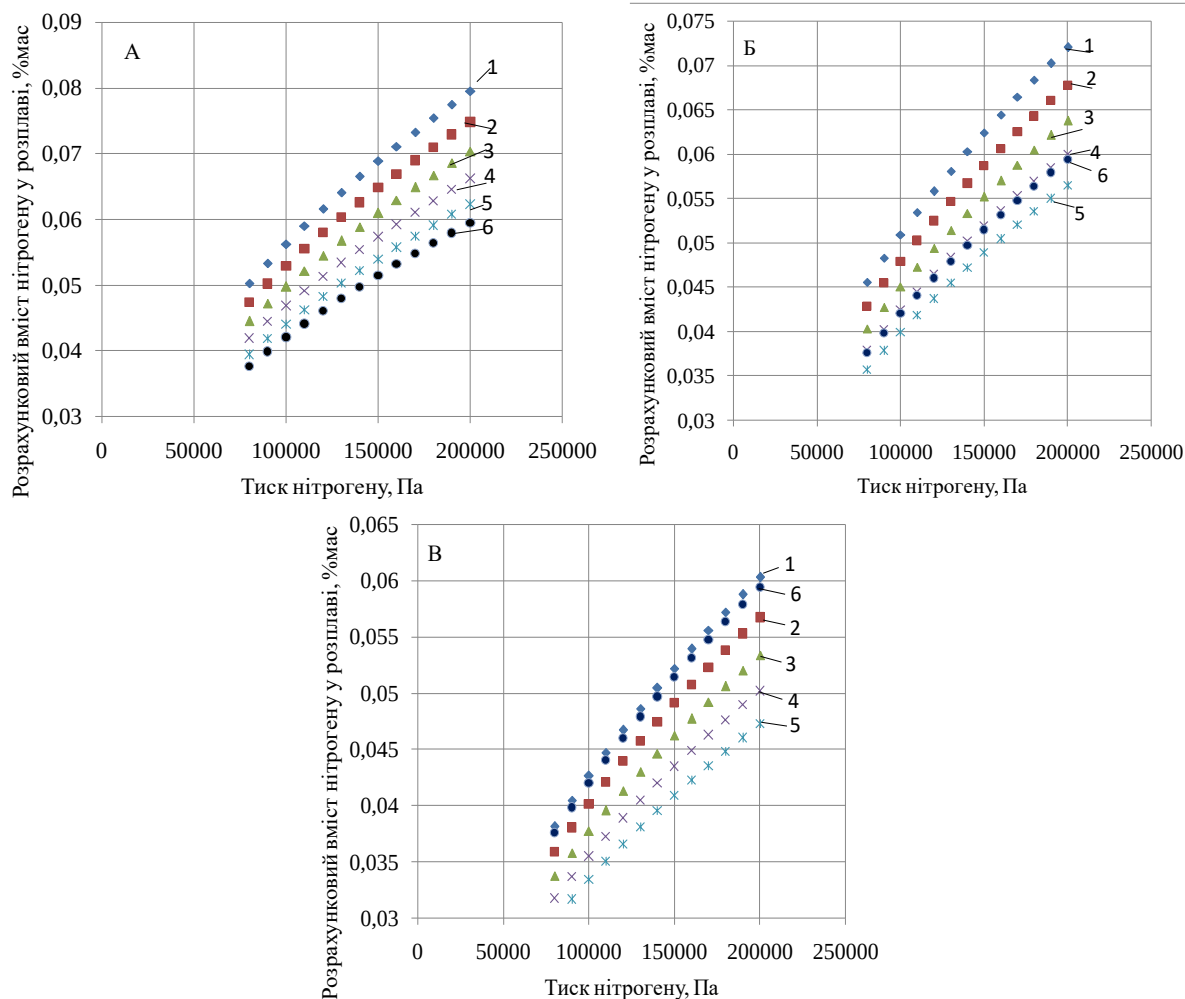


Рисунок 4 - Залежність вмісту розчиненого нітрогену у розплаві від його тиску для розплавів А-В відповідно до позначених у тексті варіантів при вмісті титану 0,25-0,05 %мас (поділка 0,05 %), що відповідає варіантам 1 – 5 у порівнянні із залежністю розчинення нітрогену при відповідному тискові газу над розплавом 6

Висновки

Проведено термодинамічний аналіз з визначення впливу вмісту різних компонентів у залізовуглецевих розплавах на ефективність розчинення нітрогену. Встановлено, що введення хрому у розплав в кількості 0,25-0,05%мас позитивно відображається на розчинності нітрогену у залізовуглецевому розплаві незалежно від вмісту вуглецю, дозволяючи збільшити вміст нітрогену у 32 - 46 рази у порівнянні зі стандартними умовами. Алюміній додатково введений у розплав негативно впливає на вміст нітрогену, знижуючи його

кількість навіть при малій кількості введення. Введення титану у розплав є найбільш позитивним при низькому вмісті вуглецю і дозволяє збільшити розчинності нітрогену у 1,0-1,33 рази при вмісті титану від 0,05 до 0,25 %мас. відповідно. Необхідно відзначити, що для оцінювання впливу того, чи іншого компонента на розчинення нітрогену у металевому розплаві необхідно розглядати не вплив окремого компонента на розплав, а поєднання декількох компонентів, взаємний прояв яких може бути досить важливим.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гудремон Э. Специальные стали. – М.: Металлургия, 1966. – 456 с.
2. Королев М.Л. Азот как легирующий элемент в стали. – М.: Металлургиздат, 1961. – 264 с.
3. Азот в металах/ В.В. Аверин, А.В. Ревякин, В.И.Федорченко, Л.Н.Козина. – М.: Металлургия,- 1976.- 221с.
4. Химушин Ф.Ф. Нержавеющие стали. – М.: Металлургиздат, 1967. - 799с.
5. Морозов А.И. Водород и азот в стали. – М.: Металлургиздат, 1968. - 280с.
6. Pelke R.D., Elliot I.F. The Solubility of Nitrogen in Liquid Iron Alloys// Transaction of the Metallurgical Society of AIME. - 1963.- vol. 227. -№5. -P. 849 - 855.
7. Казачков Е.А. Расчеты по теории металлургических процессов. – М.: Металлургия, 1988. - 288 с.
8. Температурная зависимость растворимости азота в жидком железе/ В.В.Юрин, Г.И.Котельников, А.Я.Стомахин, В.А. Григорян // Известия вузов. Черная металлургия. - 1986. - № 11. - С. 40 - 45.
9. Nitrogen solubility in cast iron containing C, Si and Mn / Jang JM, Kim DH, Paek MK, et al. // ISIJ Int. - 2018. – vol.58 (7). – P. 1185 – 1190.
10. Nitrogen Solubility in Liquid Manganese Alloys Containing Silicon, Iron and Carbon / Jung-Mock JANG, June-Yong EOM, Min JIANG, Min-Kyu PAEK and Jong-Jin PAK// ISIJ International.- 2013. - vol. 53. - № 5. - P. 768 – 773.
11. Thermodynamics of Nitrogen Solubility and AlN Formation in Multi-Component High Mn Steel Melts/ Jung-Mock JANG, Min-Kyu PAEK and Jong-Jin PAK// ISIJ International. – 2017.- vol. 57. - № 10. - P. 1821 – 1830.

REFERENCES

1. Goodremont E. Special steels. - . Moscow: Metallurgy, 1966. - 456 p.
2. Korolev M.L. Nitrogen as an alloying element in steel. - . Moscow: Metallurgizdat, 1961. - 264 p.
3. Nitrogen in metals / V.V. Averin, A.V. Revyakin, V.I. Fedorchenko, L.N. Kozina. - Moscow: Metallurgy, - 1976. - 221s.
4. Khimushin F.F. Stainless steel. - . Moscow: Metallurgizdat, 1967. – 799 p.
5. Morozov A.I. Hydrogen and nitrogen in steel. - . Moscow: Metallurgizdat, 1968. – 280 p.
6. Pelke R.D., Elliot I.F. The Solubility of Nitrogen in Liquid Iron Alloys// Transaction of the Metallurgical Society of AIME. - 1963.- vol. 227. -No.5. -P. 849 - 855.
7. Kazachkov E.A. Calculations according to the theory of metallurgical processes. - Moscow: Metallurgy, 1988. - 288 p.
8. Temperature dependence of nitrogen solubility in liquid iron / V.V. Yurin, G.I. Kotelnikov, A.Ya. Stomakhin, V.A. Grigoryan // News of universities. Ferrous metallurgy. - 1986. - No. 11. - P. 40 - 45.

9. Nitrogen solubility in cast iron containing C, Si and Mn / Jang JM, Kim DH, Paek MK, et al. // ISIJ Int. - 2018. - vol.58 (7). – P. 1185 – 1190.
10. Nitrogen Solubility in Liquid Manganese Alloys Containing Silicon, Iron and Carbon / Jung-Mock JANG, June-Yong EOM, Min JIANG, Min-Kyu PAEK and Jong-Jin PAK// ISIJ International. - 2013. - vol. 53. - No. 5. - P. 768 - 773.
11. Thermodynamics of Nitrogen Solubility and AlN Formation in Multi-Component High Mn Steel Melts/ Jung-Mock JANG, Min-Kyu PAEK and Jong-Jin PAK// ISIJ International. – 2017.- vol. 57. - No. 10. - P. 1821 - 1830.

Received 12.01.2023.

Accepted 21.02.2023.

UDC 669.184.14

T. Golub, L. Molchanov, S. Semikin

**THERMODYNAMIC ANALYSIS OF NITROGEN DISSOLUTION
PROCESSES IN IRON-CARBON MELT
AT DIFFERENT CONCENTRATIONS OF IMPURITIES**

In modern conditions, the requirements for the service properties of metal products, and in particular for the steels from which they are made, are significantly increased. The effectiveness of nitrogen dissolution in the iron-carbon melt was evaluated by means of thermodynamic calculations with the additional introduction of titanium, chromium and aluminum. Additional introduction of chromium into the melt in the amount of 0.25-0.05% by weight. has a positive effect on the solubility of nitrogen in the iron-carbon melt regardless of the carbon content, allowing to increase the nitrogen content by 32-46 times compared to standard conditions. At the same time, the lower the carbon content in the melt, the higher the calculated dissolved nitrogen content in the melt and the better the increase in the amount of chromium added to the melt is manifested. The effect of additionally introduced aluminum in the melt on the nitrogen content showed that aluminum negatively affects the solubility of nitrogen, even in small amounts. This is especially evident when the carbon content in the melt increases. The analysis of the possible effect of additional introduction of titanium into the melt on the solubility of nitrogen showed that the most positive effect is manifested at a low carbon content (an increase in solubility by 1.0-1.33 times at a titanium content of 0.05 to 0.25% by weight, respectively). When the carbon content is increased to 0.45% by mass, the addition of titanium has a positive effect only when the amount is greater than 0.1% by mass (by 1.0-0-1.27 times). At a higher carbon content, the solubility of nitrogen when titanium is introduced increases only at its amount of 0.25% by mass. At a lower concentration, the dissolution decreases by an amount of up to 1.5%, ie, only the effect of carbon on the reduction of nitrogen solubility is manifested. According to the performed

studies, it was established that the best element that can increase the degree of assimilation of nitrogen by iron-carbon melt is chromium; titanium can be used in certain cases for a specific range of steels. In addition, it should be taken into account that in order to evaluate the influence of one or another component on the dissolution of nitrogen in the metal melt, it is necessary to consider not the influence of a single component on the melt, but a combination of several components, the mutual manifestation of which can be quite important.

Keywords: iron-carbon melt, nitrogen, chromium, aluminum, titanium, dissolution.

Голуб Тетяна Сергіївна, старший науковий співробітник, Інститут чорної металургії ім.. З.І. Некрасова НАН України.

Молчанов Лавр Сергійович, завідувач відділу ФТПМС, Інститут чорної металургії ім.. З.І. Некрасова НАН України.

Семикін Сергій Іванович, старший науковий співробітник, Інститут чорної металургії ім.. З.І. Некрасова НАН України.

Golub Tetyana, senior researcher, Iron and steel institute of Z.I.Nekrasov NANU.

Molchanov Lavr, head of the department of PTPSM, Iron and steel institute of Z.I.Nekrasov NANU.

Semikin Serhii, senior researcher, Iron and steel institute of Z.I.Nekrasov NANU.

DOI: 10.34185/1991-7848.2023.01.04

УДК 681.532.1, 62-531.1

М.Д. Зінченко, О.Ю. Потап, В.І. Шибакінський

**ЗАСТОСУВАННЯ НЕПРЯМИХ МЕТОДІВ ОЦІНКИ
ЗМІНЕННЯ ТОВЩИНИ ПРОКАТУ ВНАСЛІДОК
ВПЛИВУ ЗНОШЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ПРОКАТНОЇ КЛІТИ**

***Анотація.** На розміри прокату впливають різні чинники, які призводять до коливань товщини і довжини прокату і появи штанг нормальної довжини при порізці на пилах, тому питання підвищення точності розмірів прокату є завжди актуальними. Пристрої вимірювання товщини фасонних профілів прокату складної форми поперечного перерізу є складні комп'ютерні комплекси, які мають високу вартість. Метою дослідження є вивчення можливості контролю розмірів прокату з застосуванням непрямих методів оцінки змінення товщини прокату. Для цього виконали дослідження вимірювання довжини розкатів з застосуванням вимірювача довжини прокату, в основі якого полягає принцип вимірювання довжини прокату по обертах валків. Дослідження роботи вимірювача показали, що застосування мікроконтролера для обробки результатів вимірювання дозволяє підвищити точність вимірювання довжини розкату. Це відбувається урахуванням пробуксування валків відносно прокату при захваті металу і усередненню кількості імпульсів, яка припадає на базову відстань фотодатчиків. Порівняння результатів вимірювання з фактичною довжиною прокату підтвердили можливість застосування цього приладу для вимірювання довжини прокату в потоці. При дослідженні процесу прокатки вимірювалась довжина розкатів після чистої кліти, температура розкатів перед чистою кліттю, струм двигуна головного привода чистої кліт, товщина прокату. Результати вимірювань показали наявність низькочастотної складової цих параметрів, яка пов'язана зі зношенням підшипників і калібрів валків, що призводить до збільшення товщини прокату. Зношення підшипників не є стаціонарним процесом, тому компенсація впливу зношення на розміри прокату повинна виконуватись за результатами вимірювання, а не випадково, або в функції часу. Обчислення середніх значень довжини прокату, струму двигуна і температури прокату дозволяє виконувати оцінку змінення товщини прокату внаслідок*

© Зінченко М.Д., Потап О.Ю., Шибакінський В.І., 2023

зношення підшипників і калібрів валків і своєчасно компенсувати його вплив на розміри прокату.

Ключові слова: товщина прокату, вимірювач довжини прокату, довжина прокату, температура, струм двигуна, зношення підшипників і калібрів валків.

Постановка проблеми і ціль дослідження

Фасонні профілі мають складну форму поперечного перерізу, товщина різних елементів профілю відрізняється і вимірювання розмірів є складним завданням. Існують лазерні вимірювачі розмірів поперечного перерізу, але це складні комп'ютерні системи, яка мають високу вартість [1]. Проте дослідження показують, що для контролю змінення висотних розмірів прокату можна застосувати непрямі методи вимірювання, наприклад, оцінювати змінення висотних розмірів по зміненню довжини прокату, температури прокату і струму двигуна прокатної кліті. Ці параметри можна досить легко вимірювати теперішніми датчиками.

В цей час найбільш перспективними є лазерні вимірювачі швидкості руху розкату і, відповідно, довжини розкату, що забезпечують високу точність вимірювання [2]. Проте, їх основним недоліком є висока вартість і обмеження при роботі в умовах гарячої прокатки. В той самий час застосування мікропроцесорних контролерів, що забезпечують необхідні обчислювальні процедури, дозволяє створити задовільні за точністю та вартістю вимірювачі довжини розкату.

Метою роботи є дослідження процесу прокатки з застосуванням вимірювача довжини прокату, який реалізує принцип вимірювання довжини розкату по обертах валка [3], але виготовлений з застосуванням мікропроцесорної техніки.

Матеріали і результати досліджень

Для контролю довжини розкату в потоці був розроблений, виготовлений і випробуваний на стані 550 БАТ "ДМЗ ім.Петровського» вимірювач довжини розкатів, в основі якого положений спосіб вимірювання довжини розкату по обертах валків [3], число яких визначається кількістю імпульсів, які формуються генератором імпульсів при обертанні прокатних валків.

Довжина розкату, яка вимірюється даним вимірювачем, визначається за таким виразом:

$$L_1 = N_1 \frac{L_6}{N_6}, \quad (1)$$

де N_1 - кількість імпульсів, що відповідає довжині розкату, L_6 - базова відстань між фотодатчиками, N_6 - кількість імпульсів, яка припадає на базову відстань.

Блок-схема пристрою вимірювача довжини розкату наведена на рис.1.

Такий вимірювач складається з фотодатчиків наявності розкату, які були встановлені за чистовою кліттю стана на базовій відстані 6,0 м один від одного. На вал двигуна чистової кліті був встановлений датчик імпульсів, які видавав 90 імпульсів на один оберт валка. Сигнали з фотодатчиків і датчика імпульсів були заведені на мікроконтролер, результати обчислень виводились на цифровий індикатор.

У момент виходу розкату з кліті з'являється сигнал на виході фотодатчика ФД0, який надходить на вхід мікроконтролера, перший лічильник якого здійснює підрахунок загальної кількості імпульсів N_1 , що припадають на довжину всього розкату, другий лічильник здійснює підрахунок кількості імпульсів N_6 , що припадають на базову довжину L_6 . У момент приходу переднього кінця розкату в поле зору другого фотодатчика наявності металу ФД1 на його виході з'являється сигнал і запам'ятовується число імпульсів N_6 , що рахує другий лічильник, і яке припадає на базову довжину L_6 , в той час як перший лічильник продовжує рахунок імпульсів.

Після виходу розкату з кліті на виході фотодатчика ФД0 сигнал зникає і перший лічильник запам'ятовує число імпульсів N_1 , що припадає на довжину готового розкату. Після чого мікроконтролер розраховує довжину розкату по виразу (1) і виводить її на цифровий індикатор або дисплей обслуговуючого персоналу.

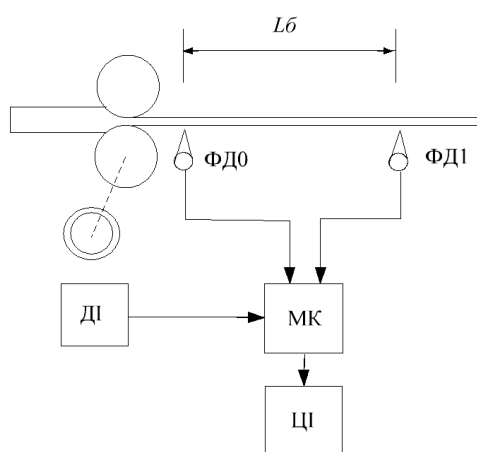


Рисунок 1 – Блок-схема пристрою вимірювання довжини розкату:

ДІ - датчик імпульсів, який вимірює оберти валків;

ФД0, ФД1 – фотодатчики наявності розкату; МК – мікроконтролер;

ЦІ – цифровий індикатор; L_b – базова відстань між фотодатчиками наявності металу

Були виконані експериментальні дослідження при прокатці швелера 12 на стані 550, за результатами яких отримані реалізації довжини розкату L , кількості імпульсів N_1 та кількості імпульсів N_b , наведені на рис.2. Середні значення цих параметрів, дисперсії та середньоквадратичні відхилення наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Результати експериментальних досліджень довжини прокату

Параметр	Матем. сподівання, м	Дисперсія, м ²	Середнеквадр. відхилення, м
L , м	48,186	24,009	4,899
N_1 , імп.	2599	69147	263
N_b , імп.	324	3,488	1,867

Довжина розкату, згідно (1), визначається кількістю імпульсів N_1 і N_b . Очевидно, що точність довжини розкату буде визначатися точністю вимірювання цих параметрів.

Вимірювання довжини прокату по обертах валків мають один недолік, який пов'язаний з пробуксовуванням валків відносно полоси при захваті розката валками. Це призведе до того, що розрахована довжина розкату

за вимірюваної кількості імпульсів N_1 буде відрізнятися від фактичної і це особливо впливає на підрахунок імпульсів, які припадають на базову довжину N_0 .

Коливання кількості імпульсів, яка припадає на всю довжину розкату, спричинені як коливаннями довжини розкату, яка поступає в чистову кліть, так і процесами деформації і прокатки в чистовий кліть і складають ± 789 імпульсів або 30,36%.

Коливання кількості імпульсів, яка припадає на базову довжину, складають $\pm 5,6$ імпульсів або 1,73% і спричинені як коливаннями випередження, які незначні, так і пробуксовуваннями валка відносно прокату при захваті метала валками, які можуть приводити до випадкових змінень кількості імпульсів для базової довжини N_0 .

Якщо відбудеться збій у визначенні кількості імпульсів, що припадають на базову довжину, наприклад, на 10 імпульсів, і кількість імпульсів N_0 буде дорівнювати 334, то загальна кількість імпульсів, що припадають на всю довжину розкату, також збільшиться на 10 імпульсів і становитиме 2609 імпульсів. У відсотках це збільшення кількості імпульсів становитиме для базової довжини – 3,08 %, для всієї довжини розкату – 0,38 %.

Якщо розрахунок довжини розкату виконувати з отриманими значеннями $N_0 = 334$ і $N_1 = 2609$, то похибка у визначенні довжини розкату складе 1,27 м або 2,62 %, а якщо при розрахунку довжини розкату залишити середнє значення $N_0 = 324$, то похибка складе 0,18 м або 0,38%, і буде визначатись тільки похибкою в визначенні загальної кількості імпульсів.

Для усунення цих збоїв щодо розрахунку довжини розкату використано поточне середнє базової кількості імпульсів і обмеження на величину максимально можливого відхилення цієї величини від середнього значення. Якщо воно перевищувало цей діапазон, воно не враховувалося щодо середнього значення.

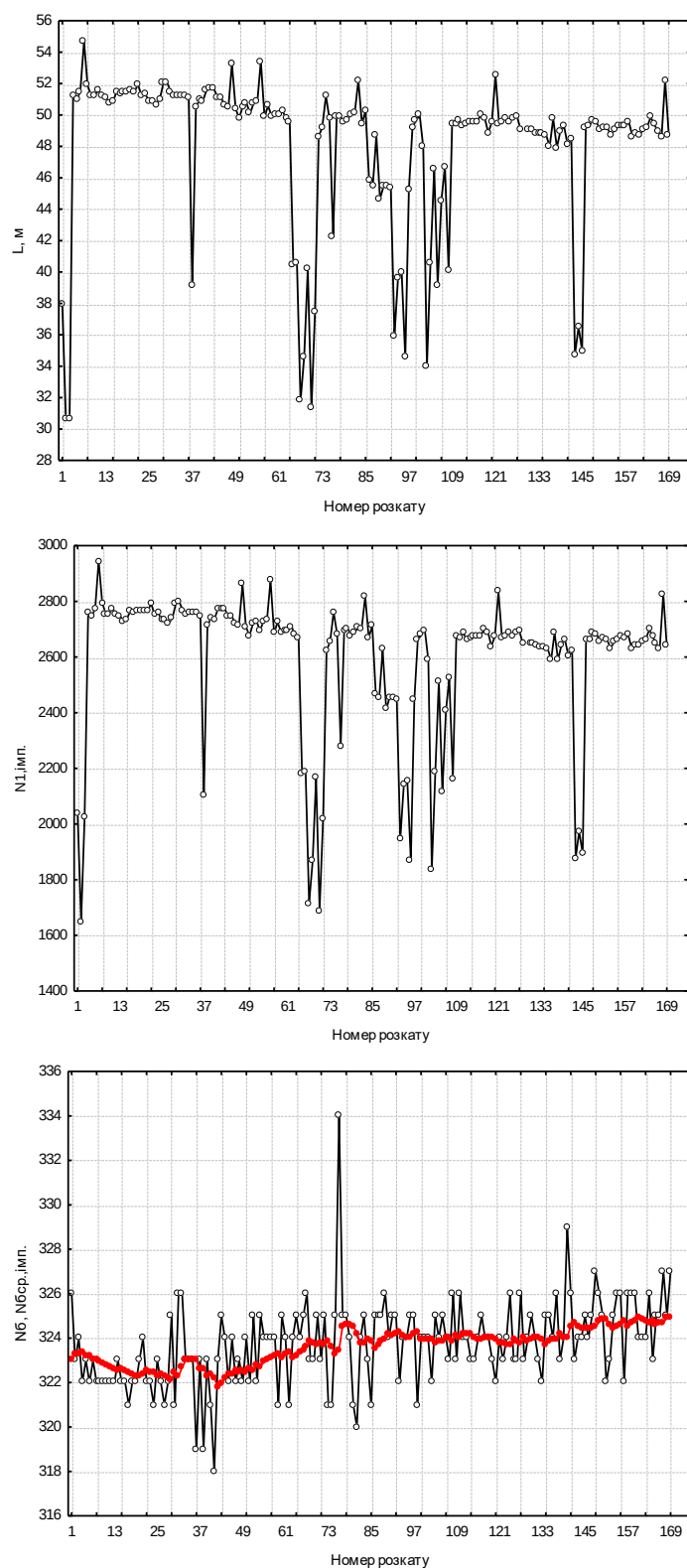


Рисунок 2 – Реалізації довжини розкату,
кількості імпульсів з датчика довжини розкату

Для визначення правдивості вимірювань даним пристроєм були виконані експериментальні дослідження, в яких фактична довжина розкату порівнювалась з довжиною розкату по показаннях пристрою. Вимірювання фактичної довжини розкату при прокатці здійснювалось наступним чином. Була виконана розмітка розкатного поля через кожні 100 мм починаючи від осі чистової кліті. При прокатці візуально фіксувалося положення переднього $S_{нк}$ та заднього $S_{зк}$ кінців розкату щодо нанесеної на розкатне поле розмітки після його виходу з чистової кліті і перед порізкою на пилах гарячого різання.

Далі визначалася довжина розкату за виразом:

$$L_p = S_{нк} - S_{зк} \quad (2)$$

Дана довжина є фактичною довжиною розкату. Одночасно зчитувалися показання з дисплея вимірювача довжини розкату.

На рис.3 наведена залежність довжини, виміряної цим пристроєм, від фактичної довжини, виміряної по розмітці на розкатному полі.

Рівняння регресії, що описує цю залежність, має вигляд

$$L_{изм} = 3,89 + 0,921L_{факт} \quad (3)$$

коефіцієнт кореляції складає 0,99, дисперсія, середньоквадратичне відхилення, математичне сподівання довжини розкату наведені в таблиці 2.

Точність вимірювання визначається як $\pm 3\sigma_{зал}$ і становить $\pm 0,612$ м або $\pm 1,23\%$.

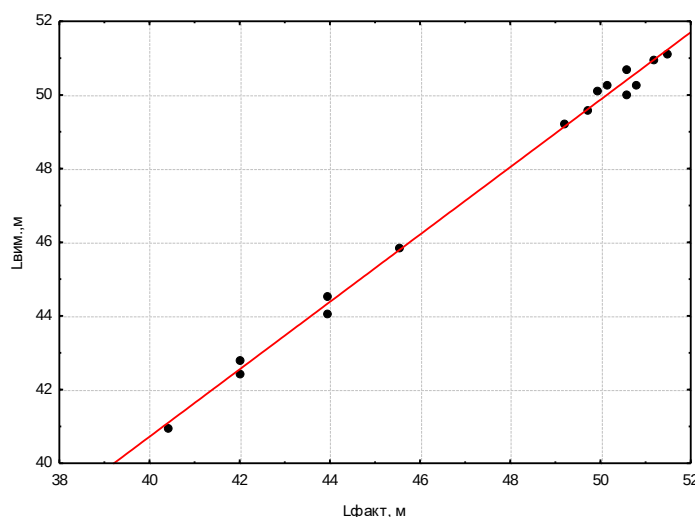


Рисунок 3 – Залежність показань вимірювача довжини розкату від фактичної довжини розкату

Таблиця 2

Порівняння показань довжини розкату, виміряної
за допомогою вимірювача довжини, і виміряної вручну

Спосіб вимірю- вання	Матем. споді- вання, м	Дис- персія, м ²	Середньо- квадрат. відхилення, м	Залишкові		Коефі- цієнт кореля- ції
				Дис- персія, м ²	Середн.квад.від- хилення $\sigma_{\text{зал}}$, м	
Вимірю- вач довжини	48,86	10,66	3,26	0,0424	0,206	0,99
Фактична довжина	48,90	8,87	2,98			

Виконали експериментальні дослідження змінення довжини розкату в чистовій кліті стана 550 упродовж прокатки 169 розкатів, реалізація довжини розкату наведена на рис.2. Реалізація довжини прокату в залежності від кількості прокатаних розкатів показує на поступове зменшення довжини розкату. Це може бути викликане як змінням температури розкату, так і зношенням валків і підшипників, що призводить до збільшення міжвалкового зазору, збільшення товщини розкату і зменшення довжини розкату. Якщо швидкість прокатки складає приблизно 3 м/с, довжина розката 50 м, то час прокатки вказаної кількості розкатів складає десь 85-90 хвилин і за цей час текстолітові підшипники валків можуть бути зношені.

На рис. 4 наведені реалізації температури розкатів і струму двигуна головного привода чистової кліті. На реалізації температури можна виділити низькочастотну і високочастотну складові змінення температури. Низькочастотна складова обумовлена роботою нагрівальної печі, високочастотна складова змінення температури викликана затримками розкатів на розкатному полі. Якщо розглянути залежності довжини розкату від температури (рис.5), то вона описується лінійним рівнянням регресії і досить високим коефіцієнтом кореляції 0,8 (таблиця 3, рівняння 5). З підвищенням температури розката довжина розкатів збільшується і це обумовлено зниженням сили прокатки, пружної деформації чистової кліті і зменшенням товщини розката.

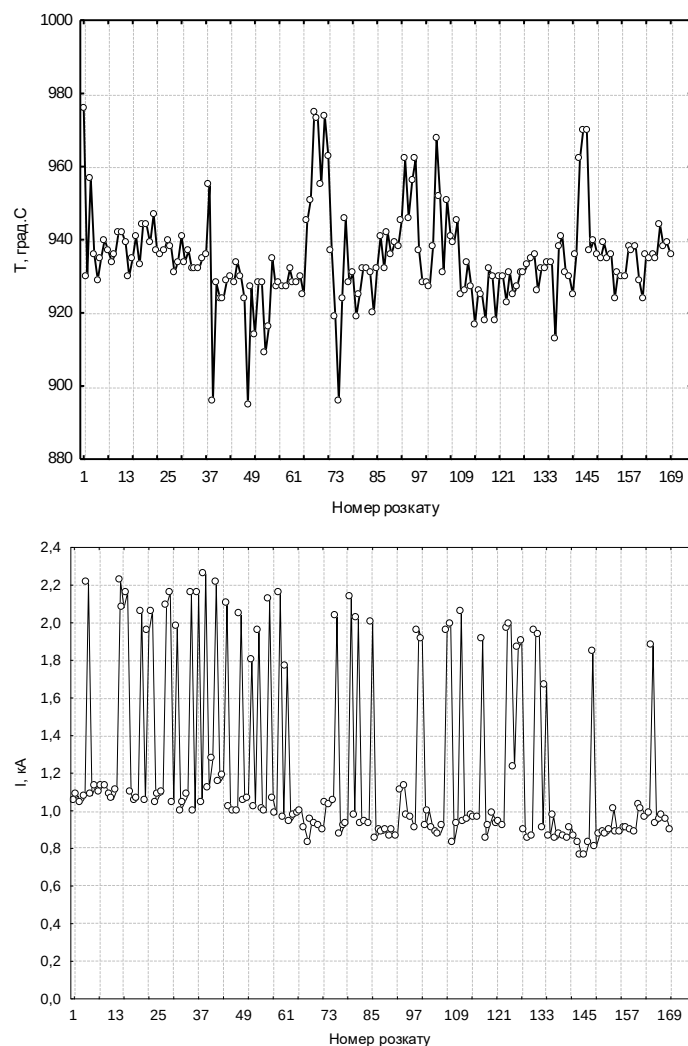


Рисунок 4 – Реалізації температури розкатів і струму двигуна головного привода чистовой кліті

На рис.6 наведено залежність довжини прокату від товщини розкату, яка показує, що зменшення товщини прокату призводить до збільшення довжини розкату, що цілком відповідає закону постійності об'єму при деформації (таблиця 3, рівняння 6).

Це підтверджується також реалізаціями струму двигуна головного приводу, що характеризують навантаження на двигун та опосередковано силу прокатки, та пружну деформацію кліті. Залежність струму двигуна головного приводу від температури наведена на рис. 7. рівняння регресії 7 в таблиці 3.

Таблиця 3

Рівняння регресії і коефіцієнти кореляції

№ рівняння	Рівняння	Коефіцієнт кореляції
5	$L = 1,88 + 0,052T$	$R = 0,8$
6	$L = 79,98 - 5,13H_1$	$R = -0.91$
7	$I = 4,33 - 0,0037T$	$R = -0,65$
8	$T = 1025 - 1,81L$	$R = -0,84$

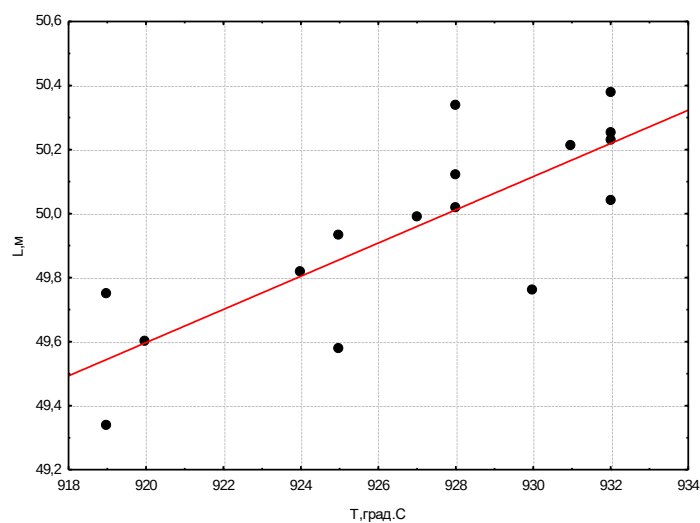


Рисунок 5 – Залежність довжини розката від температури розката

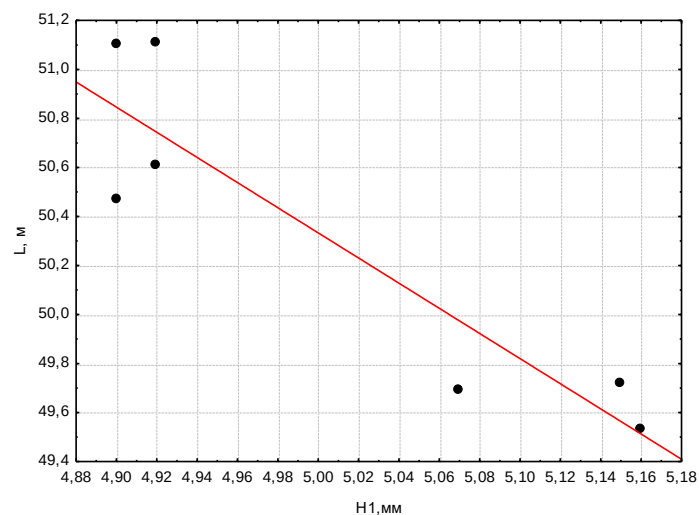


Рисунок 6 – Залежність довжини розката від товщини розката

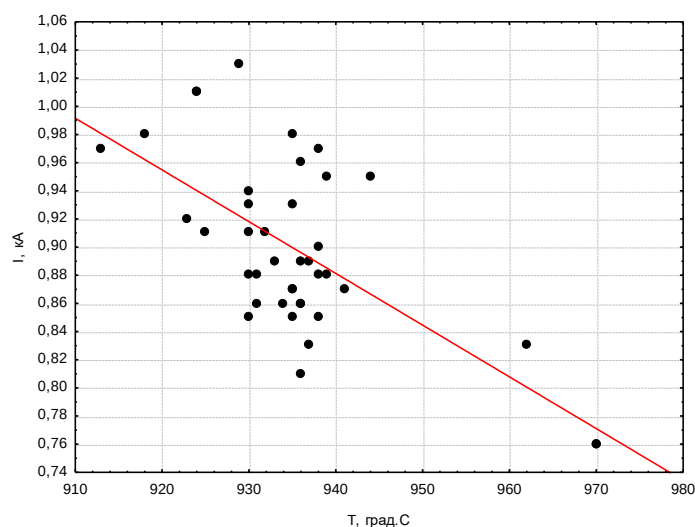


Рисунок 7 – Залежність струму від температури розкатів

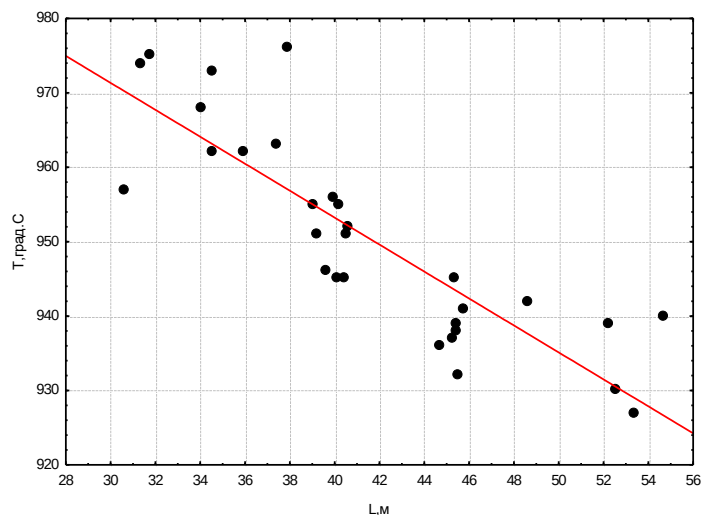


Рисунок 8 – Залежність температури розкатів від довжини розкатів

Наявність довгих і коротких розкату викликано коливаннями довжини заготовок, серед яких зустрічаються короткі і довгі заготовки, що виходять при різанні на пилах залишку через нестабільну довжину розкату після прокатки в заготівельній кліті. Слід зазначити підвищення температури коротких розкату, які інтенсивніше нагріваються в нагрівальній печі, і зниження температури довгих. На рис. 8 наведена залежність температури розкатів від довжини розкатів (таблиця 3, рівняння 8). Таким чином довжина заготовок є ще однією причиною коливань температури поряд з затримками прокатки в лінії стана.

Наведені реалізації довжини розкату свідчать, що середнє значення довжина розкату зменшується в залежності від часу прокатки, що може бути викликано зношенням підшипників і калібрів валків, яке впливає на товщину прокату. Збільшення товщини прокату від зносу буде призводити до зменшення довжини розкату. Наприклад, зменшення довжини розкату на 2,5 м призведе до збільшення товщини розкату на 0,5 мм, що при допуску на товщину прокату для швелера $12 \pm 0,5$ мм буде призводити до виходу товщини прокату за межі допуску і до появи штанг нормальної довжини при порізці на пилах гарячої різки

Але товщина і довжина прокату залежать також і від температури прокату і її треба враховувати при оцінці збільшення товщини прокату від зносу обладнання.

Висновки

Процес зношення в часі залежить від якості текстолітових вкладишів підшипників ковзання, які застосовуються на середньосортних і рейкобалочних станах і тому не можна передбачити, як швидко в часі буде змінюватися міжвалковий зазор в калібрах.

Проведені експериментальні дослідження показують, що вимірювання довжини прокату, температури прокату і струму двигуна головного привода кліті можна застосувати для непрямої оцінки змінення товщини прокату від повільно змінювальних в часі факторів, які впливають на товщину прокату, якими є зношення підшипників і калібрів.

ЛІТЕРАТУРА

1. https://www.danieli.com/en/products/products-processes-and-technologies/hiprofile_26_98.htm
2. А.Аникин, А.Федосейский. Лазерные доплеровские измерители в системе учета горячего проката. СТА №1, 2007 г
3. Способ автоматического измерения длины раската после прокатного стана. Л.С.Трус, В.С.Калинин, В.А.Ковтуневич. А.С.627008/22, Мкл В21с51/00, Б.И.№22, 1959.

REFERENCES

1. https://www.danieli.com/en/products/products-processes-and-technologies/hiprofile_26_98.htm
2. A. Anikin, A. Fedoseisky. Laser Doppler meters in the hot rolled stock accounting system. STA No. 1, 2007
3. A method for automatically measuring the length of the roll after the rolling mill. L.S. Trus, V.S. Kalinin, V.A. Kovtunevich. A.S. 627008/22, Mkl B21s51/00, B.I. No. 22, 1959.

Received 03.01.2023.

Accepted 07.02.2023.

DOI: 10.34185/1991-7848.2023.01.05

UDC 681.532.1, 62-531.1

M. Zinchenko, O. Potap, V. Shibakinsky

**THE APPLICATION OF INDIRECT METHODS OF ASSESSMENT
OF CHANGES IN THE THICKNESS OF THE ROLLED CAGE
AS A CONSEQUENCE OF THE INFLUENCE
OF THE WEAR OF THE ROLLED CAGE EQUIPMENT**

The dimensions of the rolled products are affected by various factors that lead to fluctuations in the thickness and length of the rolled products and the appearance of bars of normal length when cutting on saws, therefore the issue of increasing the accuracy of the dimensions of the rolled products is always relevant. Direct devices for measuring the thickness of rolled shaped profiles of a complex cross-sectional shape are complex computer complexes that have a high cost. The purpose of the study is to study the possibility of controlling the dimensions of rolled products using indirect methods of assessing changes in the thickness of rolled products. For this purpose, a study was carried out on the measurement of the length of rolled products using a length meter, which is based on the principle of measuring the length of rolled products by the rotation of the rolls. Studies of the meter's operation have shown that the use of a microcontroller for processing the measurement results allows to increase the accuracy of the roll length measurement. This happens by taking into account the slippage of the rolls relative to the rolling stock during metal capture and by averaging the number of pulses, which falls on the basic distance of the photosensors. Comparison of the measurement results with the actual length of the rolled product confirmed the possibility of using this device for measuring the length of the rolled product in the flow. When studying the rolling process, the length of the rolls after the finishing stand, the temperature of the rolls before the finishing stand, the thickness and the motor current of the main drive of the finishing stand were measured. The measured results showed the presence of a low-frequency component of these parameters, which is associated with the wear of bearings and roll gauges, which leads to an increase in the thickness of the rolled products. The wear of bearings is not a stationary process, so the compensation of the effect of wear on the dimensions of rolled steel should be performed according to the measurement results, and not randomly or as a function of time. Calculating the average values of rolled length, motor current, and rolled temperature makes it possible to evaluate the change in rolled thickness due to the wear of bearings and roll gauges and to compensate for its influence on the dimensions of rolled products in a timely manner.

Keywords: rolled thickness, rolled length gauge, rolled length, temperature, motor current, wear of bearings and roll gauges.

Зінченко Михайло Дмитрович, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів, Український державний університет науки і технологій.

Потап Олег Юхимович, професор кафедри автоматизації виробничих процесів, Український державний університет науки і технологій.

Шибакінський Володимир Іванович, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів, Український державний університет науки і технологій.

Zinchenko Mykhailo, Associate Professor of the Department of Automation of Production Processes, Ukrainian State University of Science and Technology.

Potap Oleh, Professor of the Department of Automation of Production Processes, Ukrainian State University of Science and Technology.

Shibakinsky Vladimir, Associate Professor of the Department of Automation of Production Processes, Ukrainian State University of Science and Technology.

DOI: 10.34185/1991-7848.2023.01.06

УДК 621.771.01:621.771.8

Д.В. Коноводов, В.І. Наконечний

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕДІНКИ ШАРІВ АЛЮМІНІЮ ТА МАГНІЮ ПРИ ПРОКАТЦІ ТРИШАРОВИХ ШТАБ

Анотація. Сучасні сплави магнію, які застосовуються у автомобільній та аерокосмічній промисловості, схильні до корозії, що обмежує їх використання. Одним з варіантів підвищення стійкості до корозії є використання штаб зі сплавів магнію всередині тришарових штаб, зовнішні шари яких складаються зі штаб іншого металу або сплаву. В роботі розглянуто тришарові штаби зі сплаву алюмінію та магнію, які були отримані методом спільної гарячої пластичної деформації на прокатному стані. Дослідження поведінки шарів різних металів в середині тришарової штаби було виконано з використанням оптичного мікроскопу. Встановлено, що зовнішні шари зі сплаву AW-2017A при прокатці тришарових штаб, обтискаються інтенсивніше, ніж внутрішні шари зі сплаву AZ31. При деформації заготовок із загальною початковою товщиною 12,8 мм зі ступенем деформації по висоті 50%, відносна деформація шарів зі сплаву алюмінію в середньому складає 50 – 52 %, а шарів зі сплаву магнію – 44%. Для штаб з початковою товщиною заготовки 8 мм, спостерігається подібне співвідношення у висотній деформації шарів.

Ключові слова: біметалева штаба, гаряча прокатка, алюміній, магній, шар, товщина, деформація.

Постановка проблеми

Застосування нових конструкційних матеріалів у машинобудівній промисловості має за мету зменшення ваги виробів та габаритів конструкцій. Одним з перспективних напрямків впровадження нових матеріалів, є застосування біметалевих композитів, які мають підвищені експлуатаційні властивості та задовольняють сучасним потребам машинобудування.

Вироби з магнієвих сплавів мають великі перспективи застосування в аерокосмічній та автомобілебудівній промисловості [1]. Але широкому

застосуванню сплавів магнію перешкоджає їх низька стійкість до корозії. Застосування біметалевих композитів зі сплавів магнію та алюмінію, де сплав алюмінію виступає у ролі захисного шару, дозволяє підвищити корозійну стійкість сплаву магнію.

Аналіз останніх публікацій

Достатньо простим у реалізації є спосіб спільного лиття для отримання біметалів [2]. Недоліком литого матеріалу є його відносно низькі механічні властивості. Ефективним способом отримання біметалів є спільна пластична деформація різних сплавів [3]. Найбільш продуктивним є процес пластичної деформації у прокатних валках. Відоме застосування процесу прокатки для отримання біметалевих, зокрема тришарових штаб зі сплавів алюмінію та магнію [4, 5]. Процес деформація може відбуватися при попередньому нагріванні заготовок до високих температур [4] або здійснюватися при кімнатній температурі [5].

Для отримання листового біметалевого прокату свою ефективність показав процес інтенсивної пластичної деформації, який отримав назву «Accumulative Roll Bonding» (ARB) [6]. При реалізації даного процесу заготовки з різних матеріалів складають пакетом та прокатують з високими ступенями деформації за різну кількість проходів. При цьому після кожного проходу заготовка поділяється навпіл та складається у новий пакет. Ступень деформації в кожному проході досягає 50%.

В роботі [7] наведено дані щодо прокатки тришарових штаб зі сплавів алюмінію та магнію при початковій температурі заготовки 360 та 410 °C з різними ступенями деформації. Їх аналіз свідчить про те, що застосування ступеня деформації на рівні 50% забезпечує надійність з'єднання шарів магнію та алюмінію.

Захист штаби зі сплаву магнію штабою з алюмінієвого сплаву, є одним з методів підвищенні корозійної стійкості магнію, адже алюмінієві сплави має високу стійкість до корозії. Легкий магній, обгорнутий стійким до корозії алюмінієм, знижує загальну вагу конструкцій. Але на сьогодні недостатньо досліджено деформацію шарів магнію та алюмінію при спільній пластичній

деформації. Тому **метою** роботи є експериментальне дослідження деформації шарів зі сплавів магнію та алюмінію при гарячій прокатці тришарових штаб.

Викладення основного матеріалу дослідження.

Експериментальне дослідження поведінки шарів алюмінію та магнію при прокатці тришарових штаб проводили на лабораторному стані дуо 210. Для дослідження використовували заготовки-пакети, які складалися з двох алюмінієвих та однієї магнієвої штаби довжиною 180 мм. Штаби були виготовлені зі сплаву магнію AZ31 (ASTM) та алюмінію AW-2017A (EN573). Штабу зі сплаву AZ31 товщиною 2 мм розміщували між двома штабами зі сплаву алюмінію AW-2017A. За рахунок використання алюмінієвих штаб різної товщини, отримали заготовки-пакети товщиною 8,0 та 12,8 мм. Ширина пакетів складала 70 мм.

З метою видалення оксидних плівок з поверхні, перед складенням у пакет, всі штаби були знежирені. Передній кінець пакету з'єднувався заклепками по кромкам штаб та заточувався для покращення захоплення заготовок прокатними валками. Задні кінці заготовок-пакетів не були зафіксовані для можливості вільної деформації металів. Тому, при прокатці, спостерігалось деяке відносне зміщення шарів магнію та алюмінію на задньому кінці прокатаного пакету. В подальшому ці кінці обрізалися.

Перед початком прокатки поверхні нижнього ті верхнього валків зачищалися наждачним папером та знежирювались етиловим спиртом. Перед прокаткою на стані 210 заготовки-пакети нагрівалися в камерній електричній печі протягом приблизно 20 хвилин до температури 450 °С. Температура зразків та печі контролювалася за допомогою термопар. Одна з термопар була встановлена безпосередньо у сплав магнію, тобто температура вимірювалася в середині пакету. Приймальний стіл прокатної кліти був вкритий керамікою для запобігання витратам тепла заготовки.

Після нагрівання пакетів до необхідної температури проводилась їх прокатка на стані дуо 210 зі ступенем деформації 50%. Швидкість прокатки складала 0,26 м/с. Зображення вихідних заготовок та прокатаних композитів представлено на рис. 1.

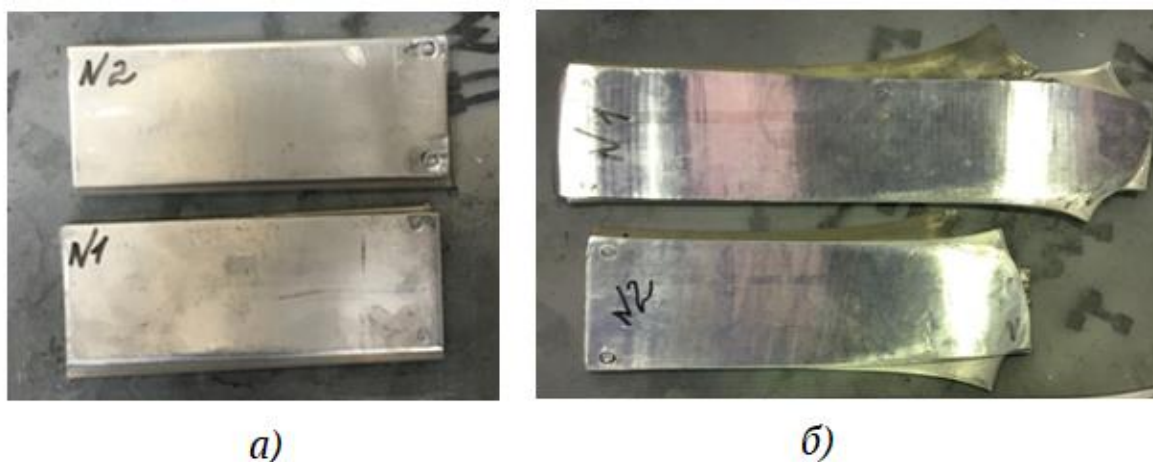


Рисунок 1 – Заготовки-пакети до (а) та після (б) прокатки

Для дослідження поведінки шарів зі сплавів алюмінію та магнію при прокатці тришарових штаб, було відрізано зразки з кожного пакету. Зразки вирізалися з середини пакета шириною 35 мм, так як прикромкові та кінцеві ділянки штаби мали певні дефекти. Відібрані зразки після шліфування та поліровки поверхні розміщувалися вертикально в контейнерах та заливалися струмонепровідним полімером. Один з торців зразка співпадав з верхньою площиною контейнера (рис. 2).



Рисунок 2 –Зразок, підготовлений для дослідження на мікроскопі

Для детального вивчення поведінки шарів з різних сплавів у біметалевому пакеті, було використано оптичний мікроскоп. За допомогою мікроскопа були зроблені знімки поверхні та виміряна товщина кожного шару. Фотографії було виконано у світлому та темному полі оптичного мікроскопу.

З оптичного мікроскопу отримували зображення при 10 та 20-ти кратному збільшенні. По зображенням з десятикратним збільшенням досліджували зразки на наявність макродефектів. Вимірювання проводили у п'яти перерізах по ширині зразка з кроком 100 мм від середини (рис. 3).

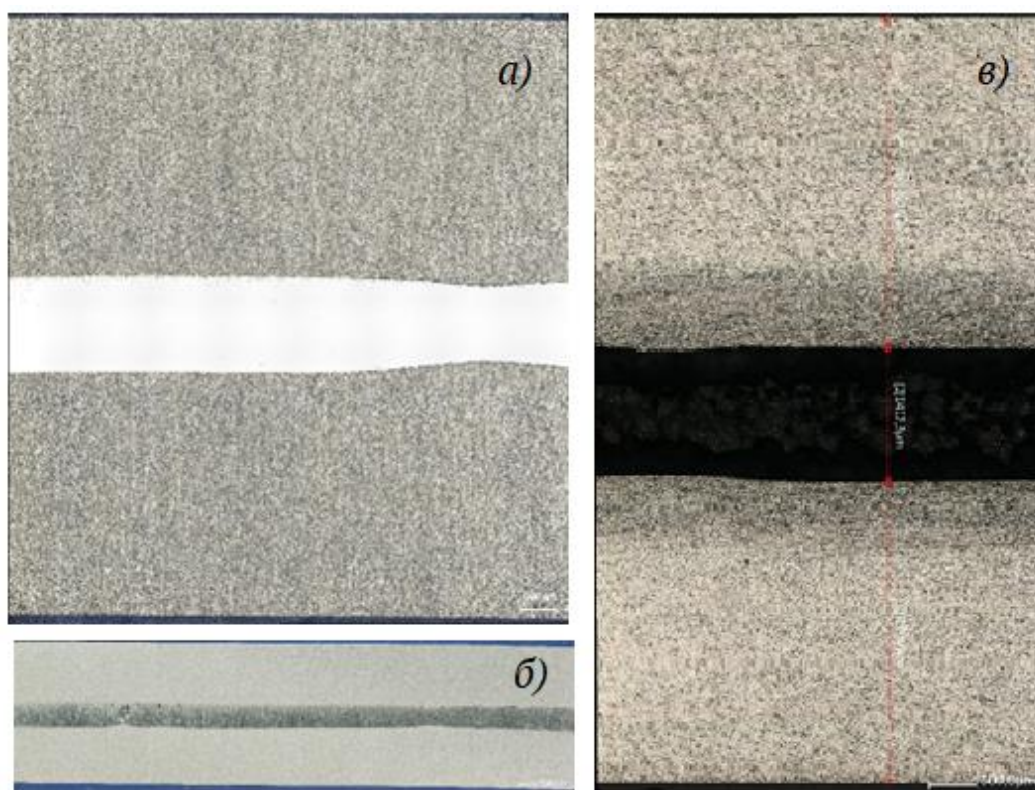


Рисунок 3 – Поперечний переріз тришарової штаби:
а – двадцятикратне збільшення; б - десятикратне збільшення;
в – десятикратне збільшення у темному полі мікроскопу з розмірами шарів

В деякий випадках спостерігалось руйнування шарів магнію в середині тришарової штаби. Більша вірогідність руйнування спостерігалась при прокатці пакетів з меншою початковою товщиною (рис. 4).

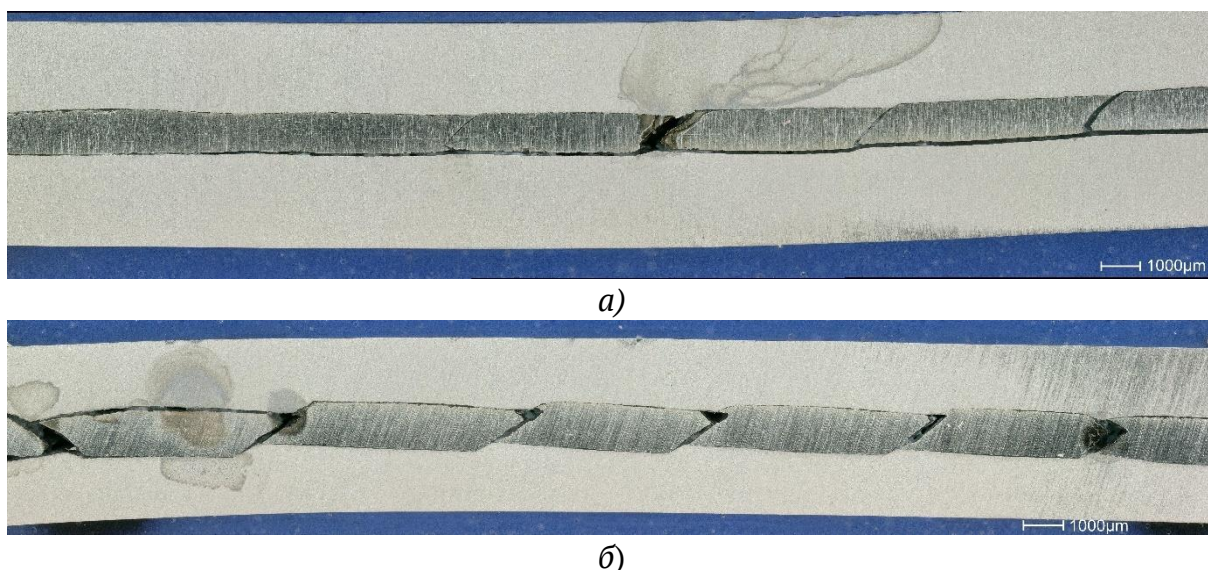


Рисунок 4 – Руйнування шарів зі сплаву магнію всередині тришарової штаби:
а – початкова товщина пакету 12,8 мм; б – початкова товщина пакету – 8,0 мм

Дослідження поведінки шарів зі сплавів магнію та алюмінію в середині тришарової штаби при гарячій пластичній деформації показало, що при заданому ступеню деформації 50%, шари зі сплаву магнію отримали меншу відносну деформацію ніж шари зі сплаву алюмінію. Причому така залежність встановлена як для пакетів з початковою товщиною 8 мм, так і для пакетів з товщиною 12,8 мм. При прокатці пакетів з початковою товщиною 12,8 мм, ступень деформації шару зі сплаву алюмінію складала 50 – 52%, а ступень деформації шару зі сплаву магнію - 44%.

Для випадку прокатки пакетів з початковою товщиною 8 мм, фактична висотна ступень деформації пакетів складала 45 %. В цьому випадку відносна деформація шару зі сплаву алюмінію коливалася на рівні 45 – 49 %, а відносна деформація шару зі сплаву магнію складала 39 %.

Деформація шарів у поперечному напрямку потребує додаткового дослідження, так як на точність визначення розширення штаби впливає багато факторів. Зокрема на точність визначення поперечної деформації може негативно вплинути зсув штаб з різних сплавів при прокатці заднього кінця пакету.

Висновки

При гарячій прокатці тришарових штаб, які складаються з двох зовнішніх штаб зі сплаву алюмінію AW-2017A та внутрішньої штаби зі сплаву магнію AZ31, спостерігалася різниця у відносній деформації шарів з різних сплавів. Зовнішні шари зі сплаву AW-2017A при прокатці тришарових штаб обтискаються інтенсивніше, ніж внутрішні шари зі сплаву AZ31. При деформації заготовок із загальною початковою товщиною 12,8 мм зі ступенем деформації по висоті 50%, відносна деформація шарів зі сплаву алюмінію в середньому складає 50 – 52 %, а шарів зі сплаву магнію – 44%. Для штаб з початковою товщиною заготовки 8 мм, спостерігається подібне співвідношення у висотній деформації шарів зі сплавів магнію та алюмінію.

ЛІТЕРАТУРА

1. Jia-fei Deng, Jing Tian, Yancai Zhou, Yuanying Chang, Wei Liang, Jinyao Ma. Plastic deformation mechanism and hardening mechanism of rolled Rare-Earth magnesium alloy thin sheet. *Materials and Design*. 2022. V.218. pp. 1-17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110678>
2. Daisuke Kikuchi, Yohei Harada, Shinji Kumai. Surface quality and microstructure of Al-Mg alloy strips fabricated by vertical-type high-speed twin-roll casting. *Journal of Manufacturing Processes*. 2019. V.37. pp. 332-338. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.12.007>
3. Karsten, E.; Gerstein, G.; Golovko, O.; Dalinger, A.; Lauhoff, C.; Krooss, P.; Niendorf, T.; Samsonenko, A.; Maier, H. J. Tailoring the Microstructure in Polycrystalline Co-Ni-Ga High-Temperature Shape Memory Alloys by Hot Extrusion. *Shape Memory and Superelasticity*. 2019. V. 5. I. 1. P. 84-94. - ISSN 2199-384X. – DOI: 10.1007/s40830-019-00208-7
4. Changzeng Luo, Wei Liang, Zhiqiang Chen, Jianjun Zhang, Chengzhong Chi, Fuqian Yang. Effect of high temperature annealing and subsequent hot rolling on microstructural evolution at the bond-interface of Al/Mg/Al alloy laminated composites. *Materials characterization*. 2013. 84. pp. 34-40. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2013.07.007>
5. Changa H., Zheng M.Y., Xub C., Fanb G.D., Brokmeier H.G., Wu K. Microstructure and mechanical properties of the Mg/Al multilayer fabricated by accumulative roll bonding (ARB) at ambient temperature. *Materials Science and Engineering: A*. 2012. 543. pp. 249-256. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.02.083>
6. Saito Y., Tsuji N., Utsunomiya H., Sakai T., Hong R.G. Ultra-fine grained bulk aluminum produced by accumulative roll-bonding (ARB) process. *Scripta Materialia*. 1998. 39. pp. 1221-1227. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(98\)00302-9](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(98)00302-9)
7. Коноводов Д.В., Сиваш В.І. Моделювання процесу гарячої прокатки тришарових штаб зі сплавів алюмінію та магнію. *Обработка материалов давлением*. 2020. №1(50). С. 259-265.

REFERENCES

1. Jia-fei Deng, Jing Tian, Yancai Zhou, Yuanying Chang, Wei Liang, Jinyao Ma. Plastic deformation mechanism and hardening mechanism of rolled Rare-Earth magnesium alloy thin sheet. *Materials and Design*. 2022. V.218. pp. 1-17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110678>
2. Daisuke Kikuchi, Yohei Harada, Shinji Kumai. Surface quality and microstructure of Al-Mg alloy strips fabricated by vertical-type high-speed twin-roll casting. *Journal of Manufacturing Processes*. 2019. V.37. pp. 332-338. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.12.007>

3. Karsten, E.; Gerstein, G.; Golovko, O.; Dalinger, A.; Lauhoff, C.; Krooss, P.; Niendorf, T.; Samsonenko, A.; Maier, H. J. Tailoring the Microstructure in Polycrystalline Co–Ni–Ga High-Temperature Shape Memory Alloys by Hot Extrusion. *Shape Memory and Superelasticity*. 2019. V. 5. I. 1. P. 84–94. – ISSN 2199-384X. – DOI: 10.1007/s40830-019-00208-7
4. Changzeng Luo, Wei Liang, Zhiqiang Chen, Jianjun Zhang, Chengzhong Chi, Fuqian Yang. Effect of high temperature annealing and subsequent hot rolling on microstructural evolution at the bond-interface of Al/Mg/Al alloy laminated composites. *Materials characterization*. 2013. 84. pp. 34–40. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2013.07.007>
5. Changa H., Zheng M.Y., Xub C., Fanb G.D., Brokmeier H.G., Wu K. Microstructure and mechanical properties of the Mg/Al multilayer fabricated by accumulative roll bonding (ARB) at ambient temperature. *Materials Science and Engineering: A*. 2012. 543. pp. 249–256. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.02.083>
6. Saito Y., Tsuji N., Utsunomiya H., Sakai T., Hong R.G. Ultra-fine grained bulk aluminum produced by accumulative roll-bonding (ARB) process. *Scripta. Materialia*. 1998. 39. pp. 1221–1227. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(98\)00302-9](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(98)00302-9)
7. Konovodov D.V., Syvash V.I. Modeling of the process of hot rolling of three-layer aluminum and magnesium alloys. *Materials working by pressure*. 2020. No.1(50). pp. 259–265. DOI: [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2020-1\(50\)259](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2020-1(50)259)

Received 16.01.2023.

Accepted 24.02.2023.

UDC 621.771.01:621.771.08

D. Konovodov, V. Nakonechnyi

AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF BEHAVIOR OF ALUMINUM AND MAGNESIUM LAYERS DURING THE ROLLING OF THREE-LAYER STRIPS

Modern magnesium alloys have prospects for wide application in the automotive and aerospace industries, where the maximum weight reduction of the structure is of great importance. These alloys have a sufficiently high specific strength. But the magnesium alloys that are used are prone to corrosion, which limits their use. One of the options for increasing corrosion resistance is the use of magnesium alloy strips inside three-layer strips, the outer layers of which consist of strips of another metal or alloy. The non-uniformity of the deformation of the strip during rolling affects the formation of the adhesion zone of the layers of different alloys. Therefore, it is relevant to study the deformation of the layers inside such a composite. The purpose of the work is to study the behavior of the layers during the rolling of three-layer bimetallic strips. Three-layer strips made of aluminum alloy AW-2017A and magnesium AZ31, which were obtained by the method of joint hot plastic deformation on a rolling mill, were considered. During hot rolling of three-layer strips, a difference in height relative deformation of layers from different alloys was observed. The study of the behavior of the layers of different metals inside the three-layer strip was performed using an optical microscope. It was established that the outer layers of the AW-

2017A alloy are deformed more intensively than the inner layers of the AZ31 alloy when rolling three-layer strips. When deformation of billets with a total initial thickness of 12.8 mm with a degree of deformation of 50%, the relative deformation of aluminum alloy layers is on average 50-52%, and magnesium alloy layers is 44%. For the billet with the initial thickness of the workpiece of 8 mm, a similar ratio is observed in the height deformation of the layers.

Keywords: bimetallic strip, hot rolling, aluminum, magnesium, layer, thickness, deformation.

Кошоводов Дмитро Володимирович, канд. техн. наук, доцент кафедри обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова Українського державного університету науки і технологій.

Наконечний Владислав Ігорович, магістр.

Konovodov Dmytro, Candidate of Technical Science, Associate Professor, Metal Forming Department named after acad. O.P. Chekmariov, Ukrainian State University of Science and Technologies.

Nakonechnyi Vladyslav, Master.

DOI: 10.34185/1991-7848.2023.01.07

УДК 622: 647.2

І.Д. Курганов

МОДЕЛЮВАННЯ ФРИКЦІЙНОЇ ПАРИ СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА, ЯК ЕЛЕМЕНТА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТРАНСПОРТУВАННЯ РУДНОЇ МАСИ У ДОДАТКУ PDE TOOLBOX МАТЕМАТИЧНОГО ПАКЕТУ МАТЛАВ

Анотація. Запропоновано використання додатку PDE Toolbox математичного пакету Matlab, який забезпечує розв'язування диференціальних рівнянь у часткових похідних методом кінцевих елементів для моделювання пари тертя взаємодії приводного барабана та конвеєрної стрічки, у якості теплової моделі з розподіленими параметрами, стрічкового конвеєра, як елемента технологічного процесу транспортування рудної маси. Додаток містить графічний інтерфейс; засоби визначення виду рівнянь і граничних умов; порядок автоматичного формування сітки кінцевих елементів; засоби для візуалізації отриманого рішення та його анімації.

Отримані результати розрахунків у програмі PDE Toolbox Matlab, які дають змогу отримати теплове поле пари тертя для аварійних та робочих режимів роботи приводного барабана досліджуваного конвеєра технологічного ланцюга транспортування вантажопотоку, які визначаються початковими та граничними умовами та коефіцієнтами рівняння теплопровідності Фур'є.

Ключові слова: стрічковий конвеєр, фрикційна пара, кут робочого ковзання, теплове поле, оптимальне керування, метод кінцевих елементів.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями

Однією з аварійних ситуацій, що найбільш часто зустрічаються, яка призводить до зупинки конвеєрної лінії, є пробуксовування приводної станції одного з стрічкових конвеєрів тракту подачі транспортованої рудної маси. В результаті доводиться зупиняти весь конвеєрний тракт і здійснювати повторний пуск, але вже завантажених конвеєрів, що може призвести до пробуксовування фрикційної передачі стрічкових конвеєрів. У технологічній експлуатації стрічкових конвеєрів часто виникають ситуації, коли натяг

конвеєрної стрічки ослаблений, що викликає збільшення опору руху стрічки. В результаті підвищуються витрати потужності, що споживається, приводною станцією конвеєра і знижується к.к.д. фрикційної пари барабан-стрічка, що збільшує стирання робочих поверхонь стрічки та футерування барабана, а в результаті їх тертя-нагрівання.

Аналіз досліджень та публікацій

Дослідженням даної проблеми займалися автори робіт [1, 2, 4], які моделювали теплові процеси в зоні контакту стрічки та барабана та проводили експериментальні дослідження, що підтверджують результати моделювання та необхідність застосування заходів щодо усунення причин.

Так в роботі, яка була виконана В.С. Волотковським, отримані такі результати. На стрічкових конвеєрах великої довжини від 467 до 1870 м, площа зірваної нижньої обклашки стрічки змінюється від 15 до 25%, що викликано виникненням пробуксовування стрічки та великими значеннями напруги в нижній обкладці стрічки при її взаємодії з приводним барабаном.

У разі пробуксування температура у зоні зчеплення стрічки та барабана зростає до 300-350 °C за 15 хвилин його роботи [4]. У своїх роботах В.Г. Пілецький виконав моделювання фрикційної пари та досліджував теплові режими приводного барабана при пробуксуванні стрічки на ньому для різних швидкостей її руху та вплив кута обхвату барабана стрічкою на швидкість зростання температури нагрівання.

У роботі [2] автори М.О. Малютін, Л.І. Попов виконали математичне моделювання фрикційної пари з урахуванням рівняння теплопровідності Фур'є. Експериментальні дослідження температури тертя в контакті стрічка-барабан, проводилися на конвеєрах комбінату «Апатит», методом термопари із записом на осцилографі. Тут результати показали, що температура на контакті ковзання за зміну (5 годин безперервної роботи) зростає 79.5 до 127°C.

Постановка задачі

Автором роботи пропонується виконати моделювання фрикційної пари як моделі з розподіленими параметрами для подальшого її використання в розробці оптимальної системи автоматичного керування.

Викладення матеріалів і результатів

Для вирішення поставленої задачі використовується додаток PDE Toolbox (від англ. Partial Differential Equation – диференціальне рівняння в часткових похідних), який містить пакет MATLAB. Додаток забезпечує вирішення диференціальних рівнянь в часткових похідних методом кінцевих елементів у двомірній постановці. Додаток включає графічний інтерфейс; інструменти завдання форми рівнянь і граничних умов; процедуру автоматичної генерації сітки кінцевих елементів; засоби для візуалізації отриманого рішення та його анімації. У зв'язку з тим, що середовище для вирішення завдань представлено не тільки алгоритмом реалізації, але й засобами введення і виведення даних і результатів, тому практичний розрахунок температурного стану досліджуваної системи розділяється на три етапи:

- підготовка початкової бази даних (БД) до розрахунку (опис геометрії, фізичних характеристик, генерація сіткового розбиття) - модуль введення початкових даних;
- розрахунок за допомогою чисельного методу та отримання БД числових результатів – модуль обчислень;
- візуалізацію та інтерпретацію результатів моделювання, отримання на виході готового робочого документа – модулем виведення результатів.

Модуль введення здійснює такі основні функції:

- опис геометрії об'єкта;
- дискретизація області визначення;
- вказівку фізичної поведінки областей та границь.

Стандартними геометричними фігурами є прямокутник (в окремому випадку квадрат), еліпс (в окремому випадку коло), багатокутник.

Операція завдання параметрів областей і кордонів для задач теплообміну дозволяє уточнити фізичну поведінку об'єкта, що досліджується: описати фізичні характеристики матеріалів елементів досліджуваної системи, джерела тепла, граничні умови, початкові умови (для нестационарних завдань). Під час вирішення рівняння теплопровідності програма PDETool дозволяє вводити граничні умови першого роду (умова Діріхле) або умови другого роду (умови Неймана). Умови Діріхле мають вигляд

$$h \cdot u = r ,$$

де h, r – скалярні коефіцієнти. Умови Неймана мають вид

$$n \cdot c \cdot \text{grad } u + q \cdot u = g ,$$

де n – вектор одиничної зовнішньої нормалі до границі розрахункової області; c – коефіцієнт PDE; q та g – скалярні коефіцієнти. Його фізичний зміст – завдання потоку температури на границі протягом усього процесу.

Для математичного представлення досліджуваної моделі необхідно задати значення коефіцієнтів рівняння теплопровідності. В результаті, розрахункова область розбивається на декілька зон. Для кожної із зон необхідно ввести значення коефіцієнтів рівняння. Рівняння у діалоговому вікні представлено у такому вигляді

$$\rho \cdot C \cdot \text{div}(k \cdot \text{grad}(T)) = Q + h \cdot (T_{\text{ext}} - T) ,$$

де ρ - щільність речовини ρ ; C - питома теплоємність речовини C ; k - теплопровідність речовини λ ; Q - об'ємна щільність потужності зовнішніх джерел тепла Q . Другий доданок правої частини рівняння у цьому вікні записано некоректно. " $h \cdot (T_{\text{ext}} - T)$ " - це не об'ємно розподілене джерело тепла, а складова щільності потоку теплової потужності через зовнішню границю розрахункової області, пропорційна різниці температур навколишнього середовища та границі розрахункової області. Насправді цей доданок відноситься до граничних умов, які в завданнях електромагнетизму називаються "імпедансними". Здець h - коефіцієнт конвективного або кондуктивного теплообміну розрахункової галузі з навколишнім середовищем, Вт м⁻² К⁻¹; T_{ext} - температура навколишнього середовища при нескінченному віддаленні від розрахункової області (тут передбачається, що розрахункова область оточена нескінченним однорідним середовищем без джерел тепла); T - температура границі розрахункової області [5].

Модуль обчислень температурного розподілу в області складної форми отримує на вході геометричний опис сітки, фізичні характеристики та граничні умови, формує та вирішує підсумкову систему рівнянь алгебри. На виході він видає значення шуканих величин (температур, температурних градієнтів тощо) у кожному вузлі сітки. Основу обчислювального модуля складають використані під час його проектування розрахункові алгоритми. У окремому випадку таким є алгоритм методу кінцевих елементів, який складається з наступних чотирьох етапів:

– виділення кінцевих елементів (розбивка заданої області кінцеві елементи); визначення апроксимуючих функцій кожного елемента, якими, зазвичай, виявляються поліноми;

– об'єднання кінцевих елементів у ансамбль. На цьому етапі отримані рівняння, що відносяться до окремих елементів, об'єднуються в систему, яка є моделлю безперервної функції, що потрібна;

– визначення невідомих вузлових значень функції. Ця процедура є найбільш складною у МКЕ. Для її реалізації розглянемо наступний алгоритм.

При виділенні кінцевих елементів значення функцій $u_1, u_2, u_3, \dots$ у вузлах розглядаються як невідомі змінні, які необхідно знайти. З цих значень, взятих по всій розрахунковій області, формується стовпцева матриця, яку позначимо $[u(\Sigma)]$. Кожному рядку $[u(\Sigma)]$ відповідає вузол сітки кінцевих елементів. Тоді апроксимацією для всієї розрахункової області (у двовірному випадку) буде

$$u(x,y) \approx [N(\Sigma)] [u(\Sigma)], \quad (1)$$

де $[N(\Sigma)]$ – матричний рядок функцій форми всіх кінцевих елементів, що входять до розрахункової області. При складанні матриць $[N(\Sigma)]$ та $[u(\Sigma)]$ проводиться наскрізна нумерація вузлів.

Наступний етап - побудова системи алгебраїчних рівнянь на основі кінцево-елементної апроксимації. В результаті розв'язання задачі вузлові значення $u_1, u_2, u_3, \dots$ повинні бути "підібрані" так, щоб вони забезпечували найкраще наближення до істинного розподілу $u(x, y)$. Цей "підбір" може здійснюватися у різний спосіб.

Визначення невідомих вузлових значень функції PDE Toolbox Matlab реалізується проекційним кінцево-елементним методом. Проекційний метод заснований на мінімізації нев'язки в диференціальному рівнянні, при підстановці до нього наближеного рішення замість точного. У методі кінцевих елементів оцінка нев'язки проводиться за окремими елементами, і також зводиться до вирішення системи рівнянь алгебри щодо вузлових значень $u(x)$.

Рішення диференціального рівняння у часткових похідних у додатку PDE Toolbox MATLAB засноване на застосуванні методу Гальоркіна з кінцевими елементами. Розглянемо математичний опис цього методу на прикладі параболічного рівняння PDE

$$d \cdot \frac{\partial u}{\partial t} - \text{div}(c \cdot \text{gradu}) + a \cdot u = f. \quad (2)$$

Застосування методу Гальоркіна до рівняння (2) дає таке інтегральне рівняння

$$\int_V [N]^T \left(d \cdot \frac{\partial u}{\partial t} - \text{div}(c \cdot \text{grad}(u)) + a \cdot u \right) dV = \int_V [N]^T \cdot f dV. \quad (3)$$

Щоб знизити порядок диференціального оператора в лівій частині (3), потрібно матрицю-стовпець вагових функцій, рівних функцій форми, записати під знак дивергенції

$$\begin{aligned} & \int_V [N]^T \cdot d \cdot \frac{\partial u}{\partial t} dV + \int_V -\text{div}([N]^T \cdot c \cdot \text{grad}(u)) dV + \\ & + \int_V (\text{grad}[N]^T \cdot c \cdot \text{grad}(u) + [N]^T \cdot a \cdot u) dV = \quad . \\ & = \int_V [N]^T \cdot f dV \end{aligned}$$

Застосуємо теорему про дивергенцію до другого інтегралу останнього рівняння, перенесемо його в праву частину і застосуємо кінцево-елементну апроксимацію (1) до шуканого поля u

$$\begin{aligned} & \int_V [N]^T \cdot d \cdot \frac{\partial u}{\partial t} dV + \\ & + \int_V \left(\text{grad}[N]^T \cdot c \cdot \text{grad}[N] + [N]^T \cdot a \cdot [N] \right) dV \cdot [u(\Sigma)] = \\ & = \int_V [N]^T \cdot f \cdot dV + \oint_S [N]^T \cdot c \cdot \text{grad}(u) \cdot dS \end{aligned}$$

або коротше

$$[K] \cdot [u(\Sigma)] = [F], \quad (4)$$

де $[K] = \int_V [N]^T \cdot d \cdot \frac{\partial u}{\partial t} dV + \int_V \left(\text{grad}[N]^T \cdot c \cdot \text{grad}[N] + [N]^T \cdot a \cdot [N] \right) dV$ – глобальна матриця коефіцієнтів (матриця “жорсткості” [3]); $[F] = \int_V [N]^T \cdot f dV + \oint_S [N]^T \cdot c \cdot \text{grad}(u) \cdot dS$ – глобальна матриця-стовпчик правої частини (матриця “навантажень”).

При виконанні розрахунків глобальне матричне рівняння (4) формується шляхом накопичення під час розгляду всіх кінцевих елементів

$$[K] = \sum_{(e)} [K^{(e)}]; \quad [F] = \sum_{(e)} [F^{(e)}] + \sum_{(\Gamma e)} [F^{(\Gamma e)}],$$

де

$$[K^{(e)}] = \int_{V^{(e)}} [N^{(e)}]^T \cdot d \cdot \frac{\partial u}{\partial t} dV + \int_{V^{(e)}} \left(\text{grad}[N^{(e)}]^T \cdot c \cdot \text{grad}[N^{(e)}] + [N^{(e)}]^T \cdot a \cdot [N^{(e)}] \right) dV$$

– локальна (елементарна) матриця коефіцієнтів; $[F^{(e)}] = \int_{V^{(e)}} [N^{(e)}]^T \cdot f dV$ –

елементарна матриця правої частини; $[F^{(\Gamma e)}] = \oint_{S^{(e)}} [N^{(e)}]^T \cdot c \cdot \text{grad}(u) \cdot dS$ –

гранично-елементна матриця правої частини; де $V^{(e)}$ – об'єм кінцевого елемента, $S^{(e)}$ – поверхневий елемент границі розрахункової області, dS – векторний диференціал площі граничної поверхні.

При моделюванні плоскопаралельних полів об'ємні інтеграли (4) можна замінити на двовимірні, а поверхневі – на криволінійні, враховуючи, що $dV = z \cdot dU$, $dS = z \cdot dl \cdot 1_z$, і z можна скоротити в лівій та правій частині (4). Тут dU – диференціал двовимірної розрахункової області у площині $z = \text{const}$, dl – векторний диференціал довжини границі розрахункової області.

PDE Toolbox MATLAB підтримує лише симплекс – елементи та лише двовимірні крайові завдання. У зв'язку з цим формули для обчислення елементних матриць, що відповідають рівнянню (2), мають вигляд

$$[K^{(e)}] = 0.5 \cdot c^{(e)} \Delta^{(e)} \cdot \left([a_x]^T \cdot [a_x] + [a_y]^T \cdot [a_y] \right) + a^{(e)} \cdot \frac{\Delta^{(e)}}{24} \cdot \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix};$$

$$[F^{(e)}] = f^{(e)} \cdot \frac{\Delta^{(e)}}{6} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}; \quad [F^{(\Gamma e)}] = \left(b_x^{(\Gamma e)} \cdot \Delta y^{(\Gamma e)} - b_y^{(\Gamma e)} \cdot \Delta x^{(\Gamma e)} \right) \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} = b_n^{(\Gamma e)} \cdot |\Delta l^{(\Gamma e)}| \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

де $c^{(e)}$, $a^{(e)}$, $f^{(e)}$ – постійні значення параметрів рівняння (2) у межах кінцевого елемента;

$\Delta^{(e)}$ – визначник елемента, що дорівнює його подвоєній площі;

$\Delta l^{(\Gamma e)} = \Delta x^{(\Gamma e)} \cdot 1_x + \Delta y^{(\Gamma e)} \cdot 1_y$ – вектор довжини граничного елемента;

$b^{(\Gamma e)} = b_x^{(\Gamma e)} \cdot 1_x + b_y^{(\Gamma e)} \cdot 1_y = c \cdot \text{grad}(u)$ – постійне значення вектора в межах граничного елемента (відповідно до заданих граничних умов Неймана).

Формули (5) впливають із співвідношень, властивих двовимірним симплекс - елементам [3]

$$\int_{U^{(e)}} N_1^a \cdot N_2^b \cdot N_3^c dU = \Delta^{(e)} \cdot \frac{a! \cdot b! \cdot c!}{(a+b+c+2)}; \int_L N_1^a \cdot N_2^b dl = l \cdot \frac{a! \cdot b!}{(a+b+1)!},$$

де L – відрізок прямий, l – його довжина; a, b, c – довільні цілі числа ≥ 0 ;

$$\Delta^{(e)} = \det \begin{pmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{pmatrix}.$$

Таким чином, кінцево-елементна технологія розв'язання задач математичної фізики зводиться до обчислення елементних матриць, відповідних заданому PDE, складання з них глобального матричного рівняння, вирішення цього рівняння та аналізу вузлового розподілу шуканої величини.

Отримане на виході модуля обчислень рішення часто не може безпосередньо використовуватися, так як маса необробленої чисельної інформації є занадто великою для сприйняття користувачем.

Модуль виведення здійснює такі функції:

- витягує значну інформацію;
- представляє значну інформацію у графічній формі для полегшення її сприйняття та інтерпретації (у вигляді графіка поверхні, кривих змін температури, карти ізотерм тощо);
- постачає необхідну цифрову та графічну інформацію у вказаний текстовий документ (наприклад, файл текстового редактора Word або табличного процесора Excel).

В результаті моделювання теплового поля фрикційної передачі при встановленому режимі роботи конвеєра отримано розподіл температури, представлений на рис. 1. При температурі довкілля 20°C температура фрикційної пари за 30 хвилин роботи конвеєра збільшилася на 5°C.

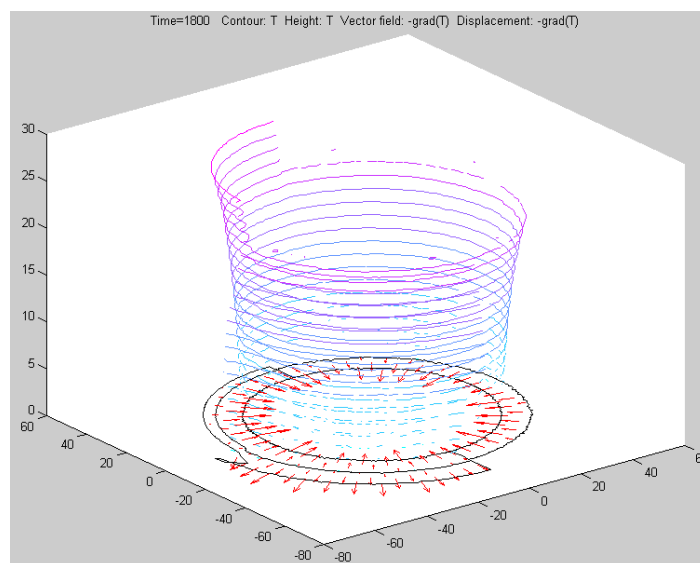


Рисунок 1 – Розподіл теплового поля у фрикційній парі барабан-стрічка при встановленому режимі роботи конвеєра

Висновки та напрямок подальших досліджень

Таким чином, результати обчислень у PDE Toolbox Matlab дозволяють отримати теплове поле роботи фрикційної пари для різних режимів роботи приводного барабана досліджуваного конвеєра технологічного ланцюга транспортування вантажопотоку, які задаються початковими та граничними умовами та коефіцієнтами рівняння теплопровідності Фур'є.

ЛІТЕРАТУРА

1. Волотковский В.С. Особенности применения и износа конвейерных лент на установках большой протяженности: Тр. Ин-та горн. дела. М-во черн. металлургии СССР// Свердловск, 1976.-Вып. 50.- С.70-76.
2. Малютин М. А., Попов Л.И. Исследование контактной температуры в приводах ленточных конвейеров // Горный журнал. – 1972. -№2. –С. 115-119.
3. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. – 392 с.
4. Трошило В.С., Пилецкий В.Г. Исследование нагрева ленты конвейера при пробуксовке приводного барабана // Гірнична електромеханіка та автоматика. – 1999. - №2(61). – С. 200-204.
5. Шмелев В.Е. Partial Differential Equations Toolbox. Инструментарий решения дифференциальных уравнений в частных производных.

REFERENCES

1. Volotkovsky V.S. Features of the use and wear of conveyor belts on long-distance installations: Tr. In-ta mountain. affairs. M-in black metallurgy of the USSR // Sverlovsk, 1976.-Iss. 50.- P.70-76.
2. Malyutin M.A., Popov L.I. Investigation of contact temperature in drives of belt conveyors // Mining Journal. - 1972. -№2. -WITH. 115-119.
3. Segerlind L. Application of the finite element method. – M.: Mir, 1979. – 392 p.
4. Troshchilo V.S., Piletsky V.G. Investigation of the heating of the conveyor belt during the slipping of the drive drum. - 1999. - No. 2 (61). - S. 200-204.

5. Shmelev V.E. Partial Differential Equations Toolbox. Tools for solving partial differential equations <http://matlab.exponenta.ru/pde/book1/>.
6. Курганов Ігор Дмитрович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри автоматизації, комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Криворізький національний університет.
7. Kurganov Igor Dmitrovich – Candidate of Technical Sciences, Senior Foreman of the Department of Automation, Computer Science and Information Technologies, Kryvyi Rih National University.

Received 17.01.2023.

Accepted 25.02.2023.

UDC 622: 647.2

I. Kurganov

MODELING OF THE FRICTION PAIR OF A BELT CONVEYOR AS AN ELEMENT OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF ORE MASS TRANSPORTATION IN THE PDE TOOLBOX APPLICATION OF THE MATLAB MATHEMATICAL PACKAGE

It is proposed to use the PDE Toolbox application of the Matlab mathematical package, which provides the solution of differential equations in partial derivatives by the finite element method for modeling the friction pair of the interaction of the drive drum and the conveyor belt, as a thermal model with distributed parameters, of the belt conveyor as an element of the technological process of transporting ore masses. The application contains a graphical interface; means of determining the type of equations and boundary conditions; the order of automatic formation of the grid of finite elements; tools for visualization of the obtained solution and its animation.

The obtained results of calculations in the PDE Toolbox Matlab program, which make it possible to obtain the thermal field of the friction pair for the emergency and working modes of operation of the drive drum of the investigated conveyor of the technological chain of cargo flow transportation, which are determined by the initial and boundary conditions and coefficients of the Fourier heat conduction equation.

Keywords: belt conveyor, a frictional couple, operating slip angle, thermal field, optimum control, finite element method.

Курганов Ігор Дмитрович, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри автоматизації, комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Криворізький національний університет.

Kurganov Igor, Candidate of Technical Sciences, Senior Foreman of the Department of Automation, Computer Science and Information Technologies, Kryvyi Rih National University.

DOI: 10.34185/1991-7848.2023.01.08

УДК 669:621

В.Ю. Міщенко

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ КОМПЛЕКСНОЇ МОДЕЛІ РУДНОТЕРМІЧНОЇ ПЕЧІ ТА ЇЇ АДЕКВАТНІСТЬ

Анотація. При створенні та апробації комплексної моделі руднотермічної печі важливим її елементом є вхідні параметри. Налаштовується модель за фізичними параметрами шихти, такими як: - питомий електричний опір; - масова теплоємність; - питома щільність; - коефіцієнт теплопровідності. Значення їх мають свої межі коливання в залежності від температури. Враховуючи вище сказане, отримати останні для кожної конкретної плавки дуже важко. Тому пропонується здійснити їх пошук шляхом розв’язання розрахункової оптимізаційної задачі за результатами здійснених плавок. Якщо в якості критерію її адекватності прийняти значення відносної середньоквадратичної похибки прогнозу вихідної величини, то для здійснення обчислювальної ідентифікації буде достатньо мати статистичну сукупність значень вихідних величин даного процесу, отриману на реальному об’єкті. Використання обчислювальної ідентифікації забезпечує ще одну істотну перевагу – можливість встановити структурну неадекватність моделі. Ідентифікація параметрів комплексної моделі руднотермічної печі шляхом розв’язання оптимізаційної задачі щодо величини її середньоквадратичної похибки прогнозу при всіляко можливих у допустимих межах значеннях цих параметрів дозволяє одночасно визначитися й з структурною та параметричною адекватністю самої моделі.

Ключові слова: руднотермічна піч, параметри шихти, феросплави, алгоритмічна модель, оптимізаційна задача.

Постановка проблеми

При створенні та апробації комплексної моделі руднотермічної печі важливим її елементом є вхідні параметри. Деякі з них відомі (геометричні та електричні), а інші необхідно визначити так як вони мають значний діапазон коливання. Дану ідентифікацію необхідно проводити для кожного виду феросплаву, оскільки ці параметри залежать від складу шихти.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В працях [1-5] розглядається розробка алгоритмічної моделі роботи руднотермічної печі, яка враховує специфіку протікання електричних, теплових та хімічних процесів, що безпосередньо взаємопов'язані між собою, при одержанні феросплавів (рисунок 1).

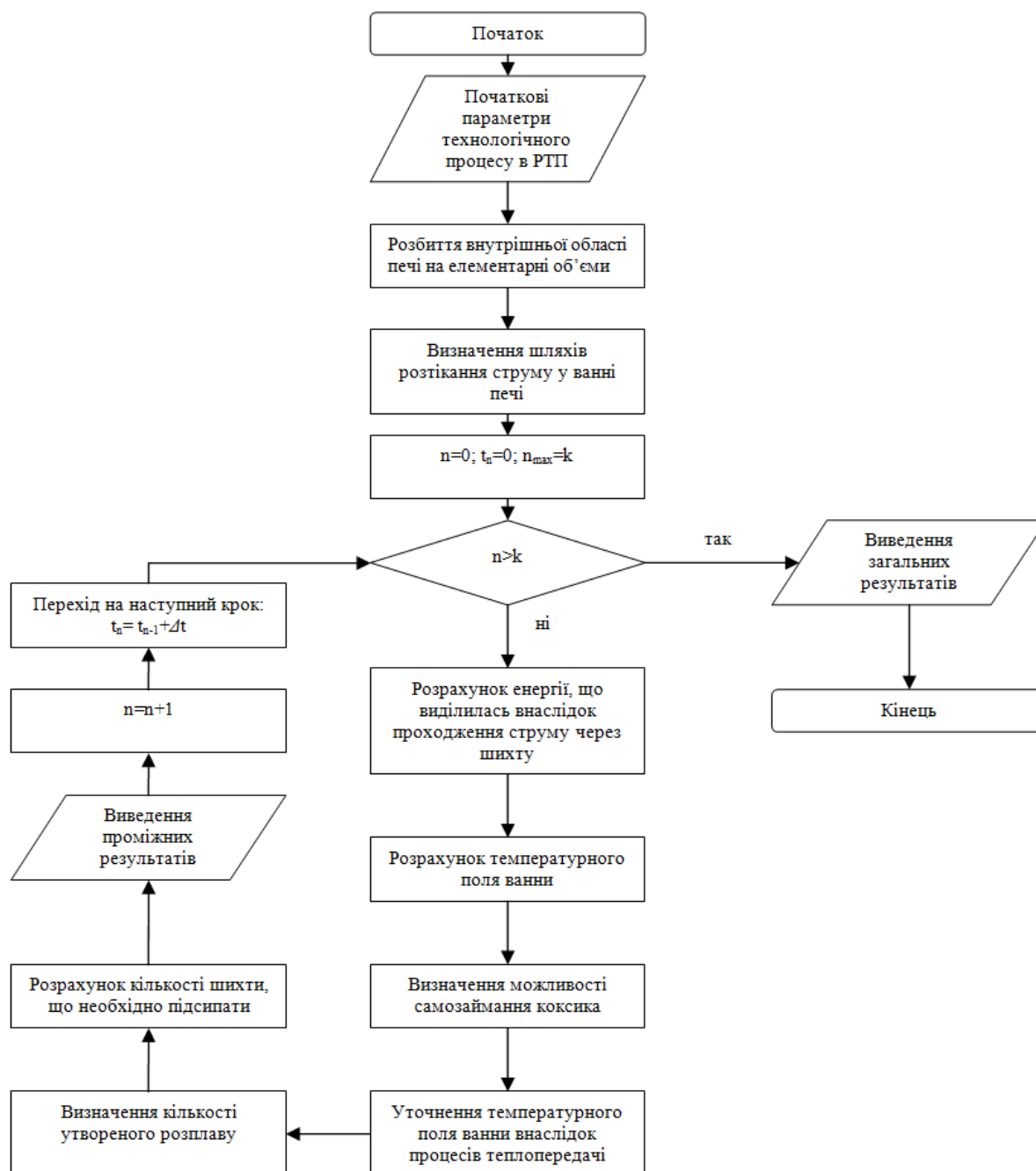


Рисунок 1 – Загальний алгоритмічної моделі руднотермічної печі

З рисунку 1 видно, що алгоритм складається з багатьох основних блоків, які, в свою чергу, теж мають більш детальний алгоритмічний опис представлених дій. Також він має одноразові та циклічні дії, які враховують динаміку протікання процесу отримання феросплавів. Вхідними даними для запропонованої моделі є: геометричні параметри печі – радіус ванни та висота заповнення її шихтою, діаметр електродів та їх глибина занурення у ванну, радіус на якому вони розташовані відносно центру печі; електричні – напруга між електродами з різними фазами; компонентний склад шихти.

Ванна РТП розділена на однакові елементарні об’єми в системі циліндричних координат, тобто за радіусом, кутом та глибиною. В цих елементарних об’ємах, кількість яких можна змінювати, і здійснюються всі необхідні розрахунки. Шляхи розтікання струму представляються як дуги, що проходить через центри електродів в напрямку до країв, центру та подини ванни печі [3].

Циклічна частини алгоритму дозволяє в динаміці відслідковувати показники плавки на заданих проміжках часу. Розрахунок енергії, що виділилась внаслідок проходження струму через шихту здійснюється на основі її електричного опору [2], а температурне поле ванни визначається за допомогою формули, що враховує зміну теплоємності. Знаючи температуру в кожній точці ванни [1], з’ясовується можливість додаткового виділення теплоти за рахунок самозаймання коксика. Якщо це має місце, то робиться перерахунок температурного поля. Далі в моделі враховуються процеси теплопередачі між елементарними об’ємами.

Після знаходження остаточного значення температури в усіх об’ємах ванни на даному кроці розрахунків стає можливим визначити загальний обсяг утвореного розплаву [4] та розрахувати кількість шихти, що необхідно підсипати. В подальшому послідовність розрахунків повторюється.

Мета дослідження

Універсальність цього алгоритму полягає у можливості, в залежності від поставлених цілей, переривання циклу розрахунків у подальшому визначені або кількості витраченої електричної енергії (загальне й поточне), або

утвореного розплаву (теж загального і поточного), чи щось інше. Налаштовується модель за фізичними параметрами шихти, такими як: - питомий електричний опір; - масова теплоємність; - питома щільність; - коефіцієнт теплопровідності. Значення їх мають свої межі коливання в залежності від температури [6]. Враховуючи вище сказане, отримати останні для кожної конкретної плавки дуже важко. Тому пропонується здійснити їх пошук шляхом розв’язання розрахункової оптимізаційної задачі за результатами здійснених плавок.

Викладення основного матеріалу дослідження

У зв’язку з вищевикладеним представляється найбільш доцільним використовувати обчислювальні методи вже на стадії ідентифікації параметрів моделі. Якщо в якості критерію її адекватності прийняти значення відносної середньоквадратичної похибки прогнозу вихідної величини, то для здійснення обчислювальної ідентифікації буде достатньо мати статистичну сукупність значень вихідних величин даного процесу, отриману на реальному об’єкті.

Слід зазначити, що використання обчислювальної ідентифікації забезпечує ще одну істотну перевагу – можливість встановити структурну неадекватність моделі. Дійсно, якщо при отриманому мінімально можливому значенні похибки прогнозу адекватність моделі не забезпечена, то це свідчить про невідповідність реальному процесу саме структури моделі. Таким чином з’являється можливість її уточнення й реалізації додаткових обчислювальних експериментів.

Для реалізації запропонованого методу ідентифікації необхідно попередньо встановити інтервали, в межах яких з достатньою ймовірністю знаходяться шукані параметри. Очевидно, що вони можуть бути визначені за вже наявною інформацією. В роботі [6] зроблене це на прикладі процесу одержання селікомарганцю. Отриманні мінімальні та максимальні значення питомого електричного опору (ρ_e), теплоємності (C_m) та теплопровідності (λ) шихти в дискретних інтервалах температур представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Інтервали можливих значень параметрів налаштування моделі
руднотермічної печі при отриманні селікомарганцю

Параметр		Інтервали температур, °C									
		100- 200	200- 300	300- 400	400- 500	500- 600	600- 700	700- 800	800- 900	900- 1000	1000- 1100
ρ_e Ом·м	min	1,051	0,520	0,358	0,275	0,267	0,390	0,808	1,150	0,622	0,311
	max	9,033	8,967	9,021	8,527	7,479	8,419	7,870	4,780	1,630	0,309
C_m Дж/(кг·°C)	min	0,575	0,534	0,486	0,498	0,479	0,461	0,448	0,441	0,428	0,438
	max	0,873	0,914	1,000	1,024	1,033	1,023	1,015	1,281	1,339	1,358
λ Вт/(м·°C)	min	0,734	0,633	0,65	0,704	0,754	0,820	0,868	0,868	0,902	0,914
	max	1,215	1,124	1,273	1,454	1,805	1,930	1,741	1,705	1,540	1,541

Питома щільність шихти також є одним із вхідних параметрів моделі, який використовується лише на початку розрахунків. Визначати її можливе мінімальне та максимальне значення пропонується за формулою:

$$\rho = a_1 \cdot b_1 + a_2 \cdot b_2 + a_3 \cdot b_3 + \dots + a_n \cdot b_n, \quad (1)$$

де b_1, b_2, b_3, b_n – значення щільності компонентів шихти, кг/м³;

a_1, a_2, a_3, a_n – доля відповідних компонентів в шихті відносно одиниці.

Підставляючи в неї спочатку мінімальні, а потім максимальні значення щільності кожного компонента, отримаємо межі коливання останнього для конкретної шихти в цілому. Результати зазначених розрахунків представлені в таблиці 2, де числа від 1 до 4 відповідають різним відсотковим складам шихт, що використовуються при отриманні селікомарганцю. Останні наведені в таблиці 3.

Таблиця 2

Межі коливання питомої щільності шихт з різним відсотковим складом компонентів

Значення	Питома щільність шихти, кг/м ³			
	1	2	3	4
min	1768,3	1808,5	1766,8	1748,3
max	1912,7	1946,5	1909,4	1889,5

Таблиця 3

Компонентний та кількісний склад шихт,
що використовуються при одержанні селікомарганцю

Назва компоненту	Од. вимір	Номер плавки			
		1	2	3	4
1	2	3	4	5	6
Марганцева руда	кг	2 600	1 300	2 600	2 600
Кокс W-14,0%	кг	800	500	880	980
Вапняк	кг	500	250	500	500
Кварцит Васильківський	кг	400	500	500	500
Скрап власного виробництва ~ 25% мет.фази	кг	400	200	400	400
Техногенний матеріал фр.0-30мм	кг	1 400	700	1 400	1 400
Техногенний матеріал фр.0-300мм	кг	200	100	200	200

На рисунку 2 представлена загальна блок-схема реалізації обчислювального експерименту для вибору значень параметрів налаштування моделі.

На початку цього експерименту вибирається кількість інтервалів для розбиття значень параметрів в попередньо визначених їх діапазонах та створюється відповідні масиви даних. Далі обирається перша комбінація і проводяться всі необхідні розрахунки на імітаційній математичній моделі руднотермічної печі, результати яких порівнюються із реальними значеннями, отриманих на об’єкті та вираховується похибка прогнозу. Потім береться інша комбінація значень параметрів і проводяться ті ж самі розрахунки. Далі таким же чином робиться перебір усіх можливих варіантів значень. Після закінчення циклу перебору виводяться значення усіх параметрів при яких була отримана мінімальна похибка розрахунку. Якщо остання прийнятна з точки зору досліджень, то вважається, що комбінація значень параметрів налаштування моделі знайдена, а саме модель адекватна процесу. А це, в свою чергу, дає можливість використовувати її для подальших обчислювальних розрахунків.

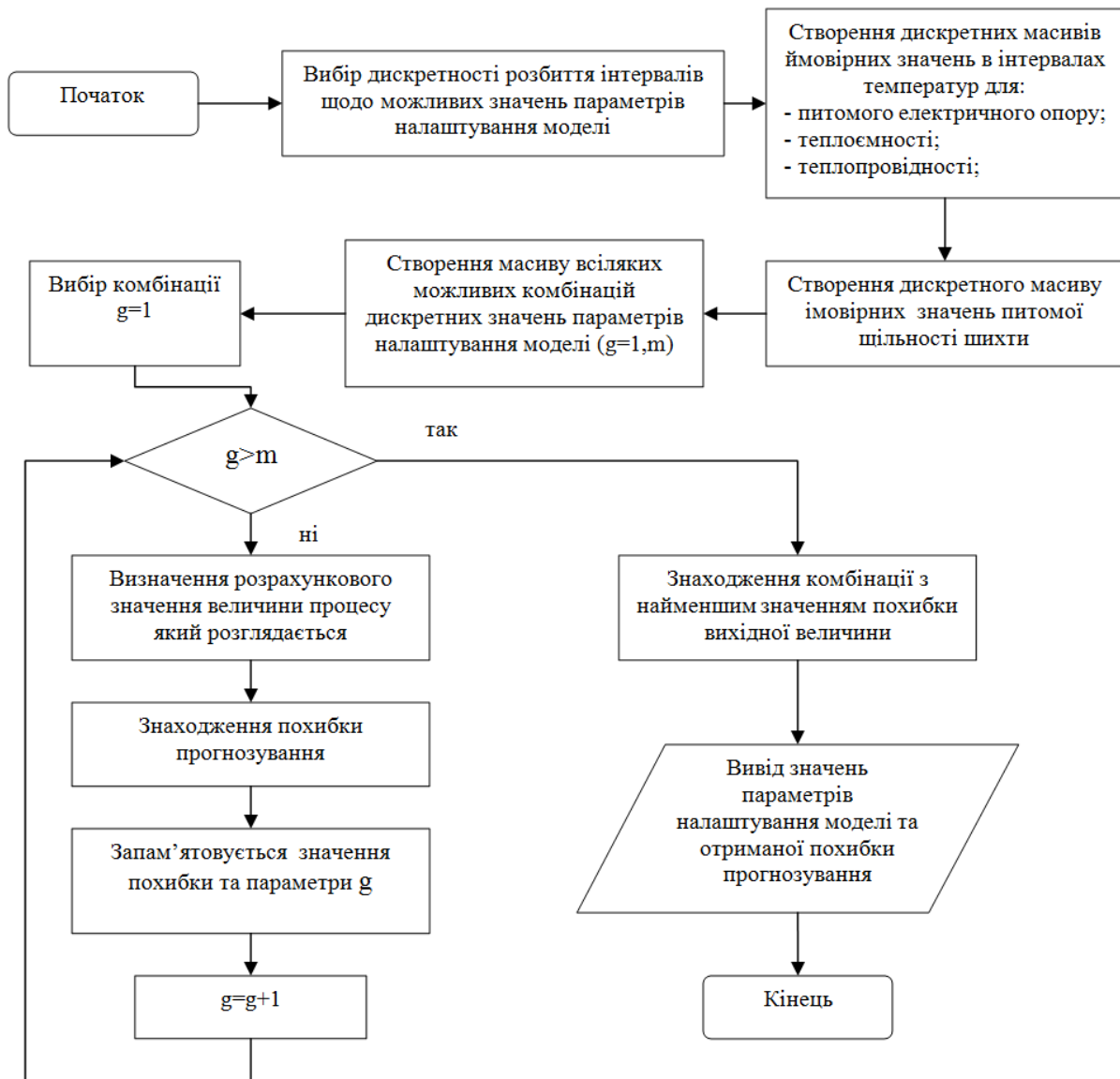


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритму щодо вибору значень параметрів налаштування моделі

Розглянемо приклад використання запропонованого методу ідентифікації параметрів моделі на основі даних таблиць 1, 2 та 3. Розіб'ємо межі коливання питомого опору, теплопровідності та теплоємності на десять дискретних значень в кожному інтервалі температур. Оброблені результати представлені в таблиці 4. Для питомої щільності шихти зробимо аналогічним чином для чотирьох варіантів її відсоткового складу (таблиця 5).

Таблиця 4

Масиви дискретних значень для питомого опору,
теплопровідності та теплоємності в інтервалах температур

№	Інтервали температур, °C														
	100-200			200-300			300-400			400-500			500-600		
	ρ_e	C_m	λ	ρ_e	C_m	λ	ρ_e	C_m	λ	ρ_e	C_m	λ	ρ_e	C_m	λ
1	1,051	0,575	0,734	0,520	0,534	0,633	0,358	0,486	0,650	0,275	0,498	0,704	0,267	0,479	0,754
2	1,938	0,608	0,787	1,459	0,576	0,688	1,321	0,543	0,719	1,192	0,556	0,787	1,068	0,541	0,871
3	2,825	0,641	0,841	2,397	0,618	0,742	2,283	0,600	0,788	2,109	0,615	0,871	1,870	0,602	0,988
4	3,712	0,674	0,894	3,336	0,661	0,797	3,246	0,657	0,858	3,026	0,673	0,954	2,671	0,664	1,104
5	4,599	0,707	0,948	4,274	0,703	0,851	4,208	0,714	0,927	3,943	0,732	1,037	3,472	0,725	1,221
6	5,485	0,741	1,001	5,213	0,745	0,906	5,171	0,772	0,996	4,859	0,790	1,121	4,274	0,787	1,338
7	6,372	0,774	1,055	6,151	0,787	0,960	6,133	0,829	1,065	5,776	0,849	1,204	5,075	0,848	1,455
8	7,259	0,807	1,108	7,090	0,830	1,015	7,096	0,886	1,135	6,693	0,907	1,287	5,876	0,910	1,571
9	8,146	0,840	1,162	8,028	0,872	1,069	8,058	0,943	1,204	7,610	0,966	1,371	6,678	0,971	1,688
10	9,033	0,873	1,215	8,967	0,914	1,124	9,021	1,000	1,273	8,527	1,024	1,454	7,479	1,033	1,805
	Інтервали температур, °C														
	600-700			700-800			800-900			900-1000			1000-1100		
	ρ_e	C_m	λ	ρ_e	C_m	λ	ρ_e	C_m	λ	ρ_e	C_m	λ	ρ_e	C_m	λ
1	0,390	0,461	0,820	0,808	0,448	0,868	1,150	0,441	0,868	0,622	0,428	0,902	0,309	0,438	0,914
2	1,282	0,523	0,943	1,593	0,511	0,965	1,553	0,534	0,961	0,734	0,529	0,973	0,309	0,540	0,984
3	2,174	0,586	1,067	2,377	0,574	1,062	1,957	0,628	1,054	0,846	0,630	1,044	0,309	0,642	1,053
4	3,066	0,648	1,190	3,162	0,637	1,159	2,360	0,721	1,147	0,958	0,732	1,115	0,310	0,745	1,123
5	3,958	0,711	1,313	3,947	0,700	1,256	2,763	0,814	1,240	1,070	0,833	1,186	0,310	0,847	1,193
6	4,851	0,773	1,437	4,731	0,763	1,353	3,167	0,908	1,333	1,182	0,934	1,256	0,310	0,949	1,262
7	5,743	0,836	1,560	5,516	0,826	1,450	3,570	1,001	1,426	1,294	1,035	1,327	0,310	1,051	1,332
8	6,635	0,898	1,683	6,301	0,889	1,547	3,973	1,094	1,519	1,406	1,137	1,398	0,311	1,154	1,402
9	7,527	0,961	1,807	7,085	0,952	1,644	4,377	1,188	1,612	1,518	1,238	1,469	0,311	1,256	1,471
10	8,419	1,023	1,930	7,870	1,015	1,741	4,780	1,281	1,705	1,630	1,339	1,540	0,311	1,358	1,541

Таблиця 5

Масив дискретних значень даних питомої щільності для різного складу шихти

№	Питома щільність шихти, кг/м ³			
	1	2	3	4
1	2	3	4	5
1	1768,3	1808,5	1766,8	1748,3
2	1784,3	1823,8	1782,7	1764,0
3	1800,4	1839,1	1798,5	1779,7
4	1816,4	1854,5	1814,4	1795,4
5	1832,5	1869,8	1830,2	1811,1
6	1848,5	1885,1	1846,0	1826,8
7	1864,6	1900,5	1861,9	1842,5
8	1880,6	1915,8	1877,7	1858,1
9	1896,6	1931,1	1893,6	1873,8
10	1912,7	1946,5	1909,4	1889,5

У розглянутому алгоритмі (рисунок 2) оптимізація здійснюється за досить розповсюдженим у застосуванні методом повного перебору можливих варіантів [7-9]. Розрахунок похибки прогнозу теж виконується за відомою методикою [10], яка не викликає жодних сумнівів щодо її доцільності. Тож реалізація алгоритму й зроблена з використанням вже відомих програмних засобів щодо цього.

На основі вище описаного алгоритму (рисунок 2) та реалізації його за допомогою програмних засобів отримані наступні результати, що представлені в таблиці 6.

Таблиця 6

Отримані результати вирішення оптимізаційної задачі значень параметрів
налаштування моделі руднотермічної печі типу РКЗ-2,5

Параметр	Інтервали температур, °C									
	100- 200	200- 300	300- 400	400- 500	500- 600	600- 700	700- 800	800- 900	900- 1000	1000- 1100
ρ_e Ом·м	4,599	3,336	3,246	3,026	3,472	3,066	3,162	2,763	0,846	0,309
C_m Дж/(кг·°C)	0,741	0,746	0,772	0,790	0,787	0,711	0,763	0,814	0,833	1,051
λ Вт/(м·°C)	0,843	0,960	1,065	1,121	1,221	1,437	1,450	1,240	1,327	1,332
ρ кг/м ³	1846,0									

Значення вихідних величин, використаних для налаштування моделі, одержані в результаті реалізації тридцяти реальних плавок на печі РКЗ-2,5. Отримані при цьому значення параметрів представлені в таблиці 6. Щодо похибки прогнозу, то за величиною обсягу спожитої електричної енергії її мінімальне значення склало 2,8%, а за кількістю отриманого селікомарганцю – 2,4%. Обидві вони прийнятні для дослідження щодо технічних об’єктів, тож можна вважати, що запропонована модель є структурно й параметрично адекватною.

Цікавим є і те, що при цих мінімальних похибках прогнозу отриманих за параметрами налаштування, які одержані за першою вихідною величиною за другою вони склали відповідно 3,1% й 3,3%. Ці значення теж є прийнятними

для розрахункових досліджень. Тож якщо модель налаштована за однією вихідною величиною, то її можна не переналаштовувати за другою.

Висновки

Ідентифікація параметрів комплексної моделі руднотермічної печі шляхом розв’язання оптимізаційної задачі щодо величини її середньоквадратичної похибки прогнозу при всіляко можливих у допустимих межах значеннях цих параметрів дозволяє одночасно визначитися й з структурною та параметричною адекватністю самої моделі.

Результати ідентифікації параметрів розглянутої моделі запропонованим оптимізаційним методом за результатами проведених реальних плавок на печі РКЗ-2,5 свідчить про її адекватність й можливість використання для проведення розрахункових експериментів для енергоефективності технологічного процесу, який розглядається.

Отримані при проведенні оптимізації ідентифікації параметрів моделі значення i та її середньоквадратичних похибок щодо обсягу спожитої електричної енергії та кількості отриманого селікомарганцю свідчать про те, що при такому налаштуванні моделі відносно прийнятої вихідної величини переналаштувати її для розгляду другої (чи навпаки) фактично не потрібно.

ЛІТЕРАТУРА

1. Качан Ю.Г. Алгоритм розрахунку температурного поля ванни руднотермічної печі /Ю.Г. Качан, Ю.Б. Ліуш, В.Ю. Міщенко // Вісник ХНУ. – 2018. – № 3 (261). – С. 19-22.
2. Kachan Yu. H. Determination of distribution of introduced energy by volume of ore-thermal furnace. / Yu.H. Kachan, V.Yu. Mishchenko// Naukovyi Visnyk NHU. – 2019. – № 3. – 138-145
3. Mishchenko V.Yu. Definition ways of the current spreading process in the internal volume of the ore-thermal furnace./ V.Yu. Mishchenko, Yu.H. Kachan// Electrical Engineering And Power Engineering. – №2. – 2019. – 51-57
4. Качан Ю.Г. Визначення обсягів розплаву та шлаку під час плавки в феросплавній печі / Ю.Г. Качан, В.Ю. Міщенко// СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ МЕТАЛУРГІЇ. Наукові вісті. №23, (2020). – Дніпро: НМетАУ –ІБК «Системні технології», 2020. – с. 53-62
5. Качан Ю.Г. Можливості зменшення обсягів електроспоживання руднотермічною піччю. / Ю.Г. Качан, В.Ю. Міщенко // СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ МЕТАЛУРГІЇ. Наукові вісті. №25, (2022). – Дніпро: УДУНТ – ІБК «Системні технології», 2022. – с. 75-84
6. Качан Ю.Г. Визначення інтервалів щодо можливих значень параметрів шихти при одержанні феросплавів/ Ю.Г. Качан, В.Ю. Міщенко // Збірник наукових праць ДДТУ № 2(41), 2022. – с. 107-114
7. Шелудько Г.А., Науменко В.В., Стрельнікова О.О. Методи розв’язання задач оптимізації: Конспект лекцій. - Харків: УкрДАЗТ, 2014. – 50 с.

8. Методи оптимізації та дослідження операцій [Текст] : навчальний посібник / Укладачі: Я. Б. Сікора, А.Й. Щехорський, Б.Л. Якимчук. – Житомир: Вид-во ЖДУ ім. Івана Франка, 2019. – 148 с.
9. Методи оптимізації без використання похідних: практикум з дисципліни «Дослідження операцій»[Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 113 «Прикладна математика», спеціалізації «Наука про дані та математичне моделювання» / Т. С. Ладогубець, О. Д. Фіногенов; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 493 Кбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 45 с.
10. Основи теорії похибок фізичних величин [Текст]: Методичні матеріали для загального фізичного практикуму/ Укладачі: Т.М. Демків, О.І. Конопельник, Я.І. Шопя. – Львів: Вид-во ЛНУ ім. Івана Франка, 2008. – 40с.

REFERENCES

1. Kachan Yu.H. Alhorytm rozrakhunku temperaturnoho polia vannoy rudnotermichnoyi pechi /Yu.H. Kachan, Yu.B. Liush, V.Iu. Mishchenko // Visnyk KhNU. – 2018. – № 3 (261). – P. 19-22. (in Ukrainian)
2. Kachan Yu. H. Determination of distribution of introduced energy by volume of ore-thermal furnace. / Yu.H. Kachan, V.Yu. Mishchenko// Naukovyi Visnyk NHU. – 2019. – № 3. – 138-145 (in English)
3. Mishchenko V.Yu. Definition ways of the current spreading process in the internal volume of the ore-thermal furnace./ V.Yu. Mishchenko, Yu.H. Kachan// Electrical Engineering And Power Engineering. – №2. – 2019. – 51-57 (in English)
4. Kachan Yu.H. Vyznachennia obsiahiv rozplavu ta sh laku pid chas plavky v ferosplavnyi pechi / Yu.H. Kachan, V.Iu. Mishchenko// SUCASNI PROBLEMY METALURHII. Naukovi visti. №23, (2020). – Dnipro: NMetAU –IVK «Systemni tekhnolohii», 2020. – P. 53-62 (in Ukrainian)
5. Kachan Yu.H. Mozhlyvosti zmenshennia obsiahiv elektrosposhyvannia rudnotermichnoiu pichiu. / Yu.H. Kachan, V.Iu. Mishchenko // SUCASNI PROBLEMY METALURHII. Naukovi visti. №25, (2022). – Dnipro: UDUNT – IVK «Systemni tekhnolohii», 2022. – P. 75-84 (in Ukrainian)
6. Kachan Yu.H. Vyznachennia intervaliv shchodo mozhlyvykh znachen parametriv shykhty pry oderzhani ferosplaviv/ Yu.H. Kachan, V.Iu. Mishchenko // Zbirnyk naukovykh prats DDTU № 2(41), 2022. – P. 107-114 (in Ukrainian)
7. Sheludko H.A., Naumenko V.V., Strelnikova O.O. Metody rozviazannia zadach optymizatsii: Konspekt lektsii. - Kharkiv: UkrDAZT, 2014. – 50 p. (in Ukrainian)
8. Metody optymizatsii ta doslidzhennia operatsii [Tekst] : navchalnyi posibnyk / Ukladachi: Ya. B. Sikora, A.I. Shchekhorskyyi, B.L. Yakymchuk. – Zhytomyr: Vyd-vo ZhDU im. Ivana Franka, 2019. – 148 p. (in Ukrainian)
9. Metody optymizatsii bez vykorystannia pokhidnykh: praktykum z dystsypliny «Doslidzhennia operatsii»[Elektronnyi resurs]: navch. posib. dlia stud. spetsialnosti 113 «Prykladna matematyka», spetsializatsii «Nauka pro dani ta matematychno modeliuвання» / T. S. Ladohubets, O. D. Finohenov; KPI im. Ihoria Sikorskoho. – Elektronni tekstovi dani (1 fail: 493 Kbait). – Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2020. – 45 p. (in Ukrainian)
10. Osnovy teorii pokhybok fizychnykh velychyn [Tekst]: Metodichni materialy dlia zahalnoho fizychnoho praktykumu/ Ukladachi: T.M. Demkiv, O.I. Konopelnyk, Ya.I. Shopa. – Lviv: Vyd-vo LNU im. Ivana Franka, 2008. – 40 p. (in Ukrainian)

Received 14.01.2023.

Accepted 20.02.2023.

DOI: 10.34185/1991-7848.2023.01.09

UDC 669:621

V. Mishchenko

IDENTIFICATION OF THE PARAMETERS OF THE COMPLEX ORE THERMAL FURNACE MODEL AND ITS ADEQUACY

Previously, the development of an algorithmic model of the operation of an ore-thermal furnace was considered, which takes into account the specifics of electrical, thermal and chemical processes that are directly interconnected when producing ferroalloys. The versatility of this algorithm lies in the possibility, depending on the set goals, of interrupting the cycle of calculations in the subsequent determination of either the amount of spent electrical energy (total and current), or the formed melt (also total and current), or something else.

The model is adjusted according to the physical parameters of the charge, such as: - specific electrical resistance; - mass heat capacity; - specific density; - thermal conductivity coefficient. Their values have their limits of fluctuation depending on the temperature. Given the above, it is very difficult to obtain the latter for each specific melt. Therefore, it is suggested to search for them by solving the computational optimization problem based on the results of the performed fusions. The use of computational identification provides another significant advantage - the ability to establish the structural inadequacy of the model.

To implement the proposed identification method, it is necessary to pre-set the intervals within which the desired parameters are found with sufficient probability. It is obvious that they can be determined based on already available information. At the beginning of this experiment, the number of intervals is selected for dividing the parameter values in their predefined ranges and the corresponding data arrays are created. Next, the first combination is selected and all the necessary calculations are carried out on the simulation mathematical model of the ore-thermal furnace, the results of which are compared with the real values obtained at the facility and the forecast error is calculated. Then another combination of parameter values is taken and the same calculations are performed. Then, in the same way, all possible variants of values are enumerated. After the end of the sorting cycle, the values of all parameters are displayed for which the minimum calculation error was obtained. If the latter is acceptable from the point of view of research, then it is considered that the combination of values of the model setting parameters is

found, namely the model is adequate to the process. And this, in turn, makes it possible to use it for further computational calculations.

The identification of the parameters of the complex model of the ore-thermal furnace by solving the optimization problem regarding the value of its root mean square error of the forecast at all possible values of these parameters within the permissible limits allows to simultaneously determine the structural and parametric adequacy of the model itself.

Keywords: ore-thermal furnace, charge parameters, ferroalloys, algorithmic model, optimization problem.

Мищенко Владислав Юрійович, асистент кафедри електропостачання промислових підприємств, Національний університет «Запорізька політехніка».

Mishchenko Vladyslav, assistant lecturer of the department of power supply of industrial enterprises, National university "Zaporizhzhya Polytechnic".

DOI: 10.34185/1991-7848.2023.01.10

УДК 004.942:681.3.068

К.Ю. Островська, В.Ф. Балакін, С.С. Черський

ВИКОРИСТАННЯ НЕЙРОМЕРЕЖЕВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ КЛАСИФІКАЦІЇ ДЕФЕКТІВ МЕТАЛОПРОКАТУ

Анотація. Основною метою роботи є створення програмної системи, що виконує класифікацію дефектів поверхні металопрокату з високою точністю (понад 90%) та високою швидкістю (не більше 1 секунди на 1 зображення) за рахунок використання штучних нейронних мереж. Для досягнення мети необхідно виконати такі завдання: 1) виконати дослідження предметної галузі, визначити можливість використання нейронних мереж для вирішення задачі класифікації дефектів металопрокату; 2) побудувати модель нейронної мережі, придатну на вирішення завдання класифікації видимих дефектів металопрокату; 3) виконати генерацію навчальної, тестової та валідаційної вибірок на основі бази даних дефектів поверхні гарячого металопрокату, наданої Північно-східним університетом (NEU); зробити аугментацію згенерованих вибірок; 4) спроектувати та реалізувати систему класифікації дефектів; 5) провести тестування та обчислювальні експерименти. В результаті роботи було розроблено програмну систему для класифікації дефектів металопрокату на базі нейромережових технологій, яка здатна менш ніж за 1с часу виконувати класифікацію дефекту на зображенні з точністю не менше 90%.

Ключові слова: Нейромережа, програмна система, класифікація, дефект, металопрокат, аугментація, API, web-інтерфейс, REST, MobileNet, InceptionV3, Python, Django web/rest framework, JavaScript, Bootstrap, набір даних, датасет.

Вступ

Контроль якості продукції є важливим етапом на металургійних заводах, адже гарантія якості означає відповідність механічних та інших властивостей певним значенням. Але коли метал перебуває у прокаті, стан його поверхні чи покриття створює окремий важливий чинник якості, який також необхідно контролювати [6].

Контроль поверхні зазвичай здійснюється візуально (людиною) на кінцевих етапах виробництва. Однак навіть тут швидкість прокату металу дуже висока і на проведення контролю є дуже мало часу. По закінченню процесу метал, що прокочується, згортається в рулон, після чого виявити дефект стає ще важче. Нерідко це призводить до відвантаження споживачеві неякісного металу, що надалі тягне за собою значні фінансові втрати для виробника.

Таким чином, очевидно, що потреба металургійних підприємств у системах автоматизації виявлення та класифікації поверхневих дефектів є дуже високою. Але незважаючи на цю високу потребу, розробників подібних систем на сьогоднішній день досить мало. Найбільш відомі: ISRA Parsytec, Codnex, Matra, EES, Siemens-VAI, Sipar та ін) [1]. При цьому існуючі системи добре виконують виявлення дефектів, але досі мають складнощі з їхньою класифікацією. Складність обумовлена тим, що поверхні сталей, що прокочуються на різних агрегатах навіть одного і того ж заводу, часто різняться на вигляд, а це призводить до ускладнення алгоритмів виявлення та класифікації дефектів поверхні [2, 5, 9]. З іншого боку, будь-яку універсальну частину системи доводиться адаптувати під конкретну виробничу лінію [7]. Крім цього, складність обумовлена великою кількістю різновидів поверхневих дефектів [4].

Характеристики та класифікація дефектів варіюються для кожного конкретного виробництва та агрегату та не регулюються загальноприйнятим стандартом. Навіть невеликі зміни у виробничому процесі можуть спричинити появу нових видів дефектів [10].

Архітектура та докладні характеристики комерційних систем автоматичного виявлення дефектів не поширюються у відкритому доступі. Однак є науково-дослідні проекти на цю тему.

Наприклад, у роботах [3, 8] описаний приклад з використанням алгоритму виділення ознак, створеного без використання машинного навчання в комбінації з нейронною мережею для класифікації.

Варто окремо відзначити, що висока точність класифікації дефектів створить можливість заздалегідь узгоджувати якість металопродукції зі

споживачем – підприємство може піти на певні поступки замість повної заміни та подальшого надвиробництва продукції.

Таким чином, розробка аналогічної системи з використанням штучних нейронних мереж для досягнення високої точності класифікації є дуже актуальним завданням.

Мета роботи

Основною метою даної роботи є створення програмної системи, що виконує класифікацію дефектів поверхні металопрокату з високою точністю (понад 90%) та високою швидкістю (не більше 1 секунди на 1 зображення) за рахунок використання штучних нейронних мереж.

Існуючі моделі нейронних мереж для класифікації дефектів металопрокату з заявленою точністю класифікації представлено в таблиці 1.

Таблиця 1

Моделі нейронних мереж для класифікації дефектів металопрокату

Модель	Заявлена точність класифікації, %	Час класифікації 1-го зображення, с
SVM	93.27	1.133
HSVM-MC	95.18	1.104
HCGA	95.04	0.158
5HL-MPCNN	89.01	0.113
7HL-MPCNN	93.03	0.062
Improved YOLO	97.55	0.012

Проектування програмної системи

У процесі проектування системи розроблено архітектура класів, представлена на рис. 1.

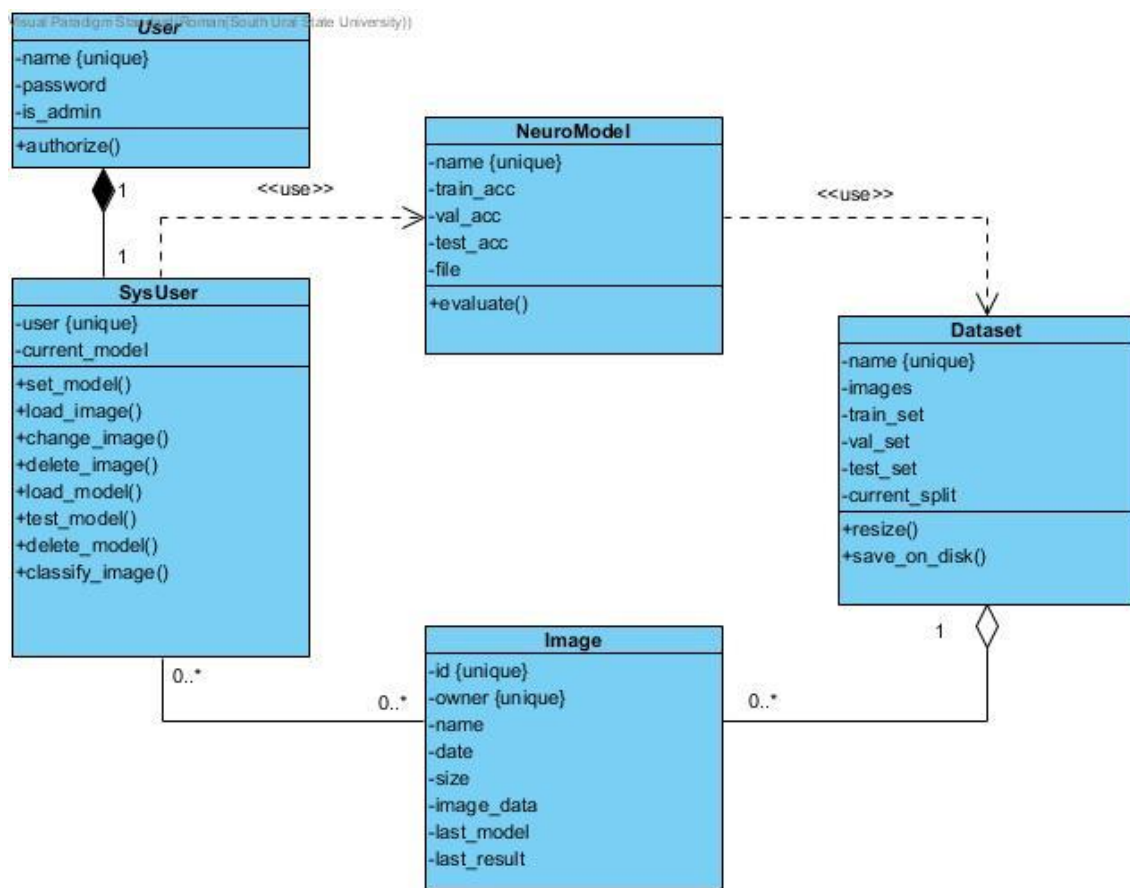


Рисунок 1 - Діаграма класів системи

Основними класами у системі є:

- User, SystemUser, Image, Dataset, NeuroModel – описуються далі.
- Клас User: стандартна модель користувача у django.
- Клас SystemUser: описує користувачів, які працюють із системою.
- Клас Image: описує зображення, що зберігається в системі
- Клас Dataset: визначає набір зображень, на основі яких формуються вибірки для роботи з моделями ШНМ.
- Клас NeuroModel: описує наявні в системі моделі ШНМ.

Для взаємодії із системою було реалізовано 2 інтерфейси: програмний та графічний.

Процес виконання запиту до API наведено на діаграмі діяльності на рисунку 2, а приклад його реального виконання з авторизацією – на рисунку 3.

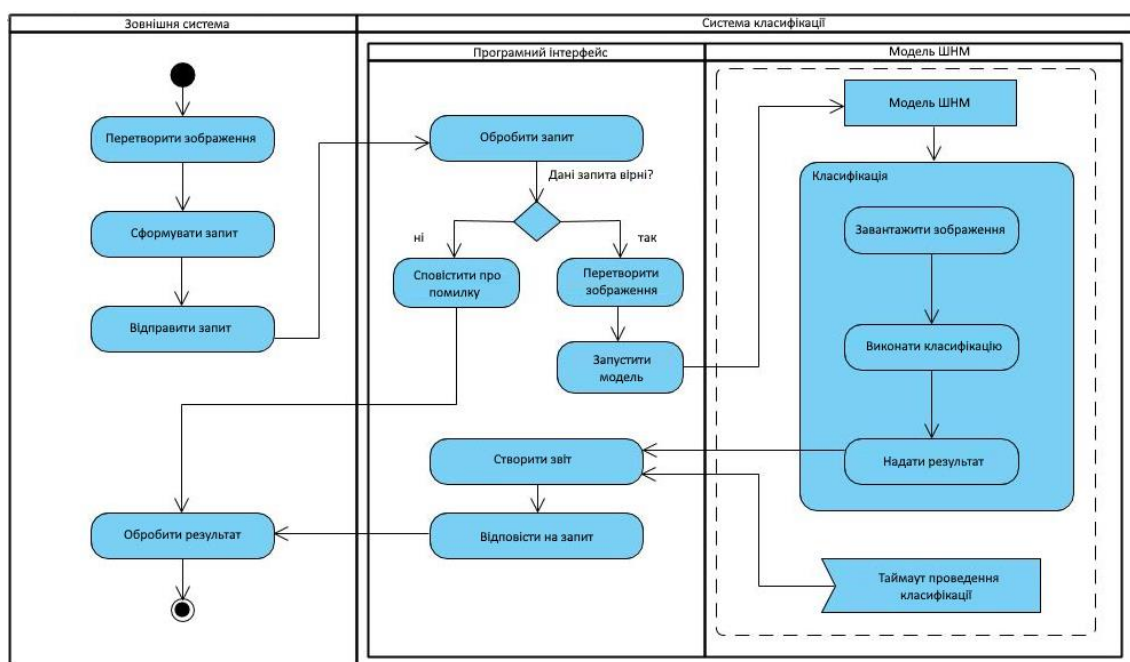


Рисунок 2 - Діаграма діяльності щодо виконання запиту до системи

```
>>> import requests, base64
>>> login, password = " ", " "
>>> auth_string = ("{login}:{password}".format(login=login, password=password)).encode()
>>> auth_key = base64.b64encode(bytes(auth_string)).decode()
>>> headers = {'Authorization': 'Basic %s' % auth_key}
>>> data = requests.get("http://127.0.0.1:8000/api/neuromodel", headers=headers).json()
>>> print (data)
{'name': 'AFDC_BC_AUG_TEST', 'train_acc': 0.88, 'validation_acc': 0.74, 'accuracy': 0.71}
```

Рисунок 3 - Приклад виконання запиту до API

Для зручності використання інтерфейсу зовнішніми системами його архітектура спроектована за правилами REST (Representational state transfer.

Базові правила REST визначаються на основних типах HTTP запитів і описуються так:

- тип запиту GET – отримати інформацію;
- тип запиту POST – редагувати інформацію;
- тип запиту PUT – додати інформацію;
- тип запиту DELETE – видалити інформацію.

Таким чином, в рамках спроектованого API було виділено 3 основні URL для виконання запитів до системи:

- для отримання інформації про поточну модель класифікації та вибору іншої моделі;

- для керування зображеннями;
- щодо класифікації.

Взаємодія користувача з цим інтерфейсом представлено на рисунку 4, а скріншот самого інтерфейсу – на рисунку 6 та таблиця 2.

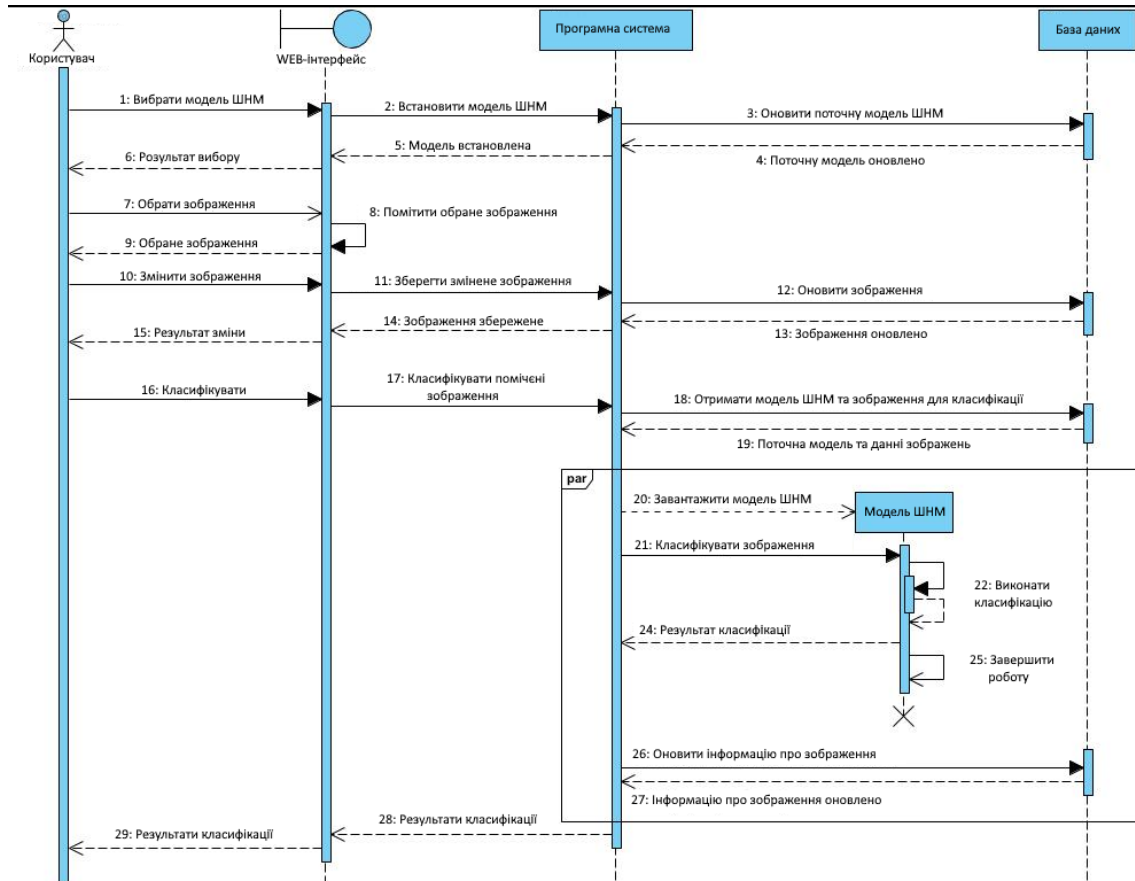


Рисунок 4 - Діаграма послідовності виконання класифікації

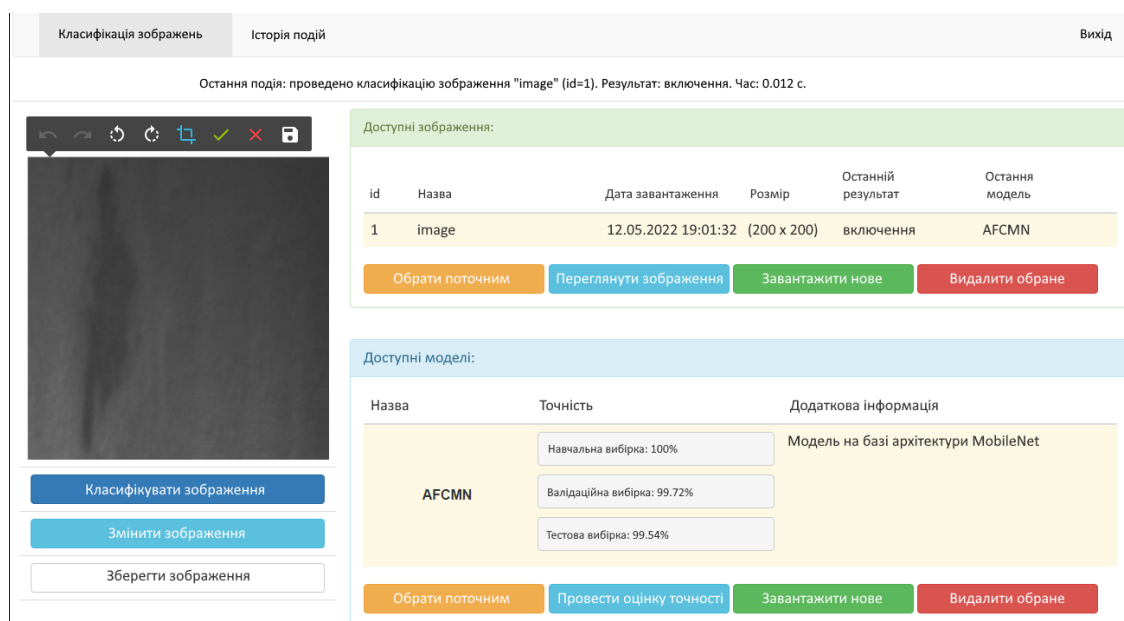


Рисунок 5 - WEB-інтерфейс системи

Таблиця 2

WEB-інтерфейс системи

Компонент	Опис та функціонал
<i>кнопка завантаження зображень</i>	надає можливість вибору та завантаження зображення з локального комп'ютера
<i>список із завантаженими зображеннями</i>	дозволяє вибрати зображення для подальшої зміни або класифікації
<i>список з моделями ШНМ у системі</i>	дозволяє вибрати одну з існуючих в системі моделей ШНМ для процесу класифікації
<i>інтерактивний модуль зміни зображення</i>	дозволяє змінити вибране зображення шляхом повороту або масштабування
<i>кнопка запуску класифікації</i>	дозволяє виконати класифікацію вибраного зображення
<i>текстове поле</i>	відображає результати операцій користувача в системі
<i>кнопка завантаження моделі ШНМ</i>	надає можливість вибору та завантаження навченої моделі ШНМ з локального комп'ютера доступно тільки адміністратору системи примітка: доступно тільки адміністратору
<i>кнопка проведення оцінки точності для моделі ШНМ</i>	дозволяє провести тестування точності класифікації для обраної моделі ШНМ на внутрішньому датасеті системи примітка: доступне тільки адміністратору

**Дослідження нейромережевих технологій
для вирішення задачі класифікації дефектів металопрокату**

Для проведення експериментів та створення нових архітектур було відібрано 3 базові моделі ШНМ: InceptionV3, MobileNet, MobileNetV2.

Модель AFDC_BC. Кількість параметрів моделі склало: 13130694, з яких 13130694 тренуваних та 0 не тренуваних.

InceptionV3 - Ця архітектура була відібрана для проведення досліджень, оскільки основна мета її розробників – ефективність обчислень та кількості параметрів для реальних додатків. Кількість параметрів моделі склало: 22854950, з яких 22820518 тренуваних та 34432 не тренуваних.

MobileNet - Відібрано для проведення досліджень, оскільки вихідна модель дуже компактна і вимагає значно менше обчислювальних ресурсів, чим багато інших нейронних мереж. MobileNet – одна з найпопулярніших мобільних технологій глибокого навчання, яка не тільки мала за розміром та ефективна в обчислювальному відношенні, але й забезпечує високу продуктивність (щодо точності). Кількість параметрів моделі склало: 3756742, з яких 3734854 тренуваних та 21888 не тренуваних.

Модель на базі MobileNetV2 - Кількість параметрів моделі становило: 2916934, з яких 2882822 тренуваних та 34112 не тренуваних.

Слід зазначити той факт, що найменша кількість параметрів з усіх моделей має AFDC_MNV2, а значить, вона є легковажною.

Реалізація. Генерація вихідних даних.

В якості вхідних даних виступає датасет дефектів гарячого металопрокату, що надається Північно-східним університетом США (NEU) спеціально для наукових досліджень, який і використовується як базовий набір даних для виконання даної роботи.

У датасеті представлено 6 різних типів дефектів, кожен із яких є по 300 різних зображень. Таким чином, датасет складається з 1800 зображень. Типи поданих дефектів такі: 1) crazing - волосовина, 2) inclusion – включення; 3) patches – плями; 4) pitted surface – горобина; 5) rolled-in-scale – вкатана окалина; Приклад зображень дефектів з датасета наведено на рисунку 6.

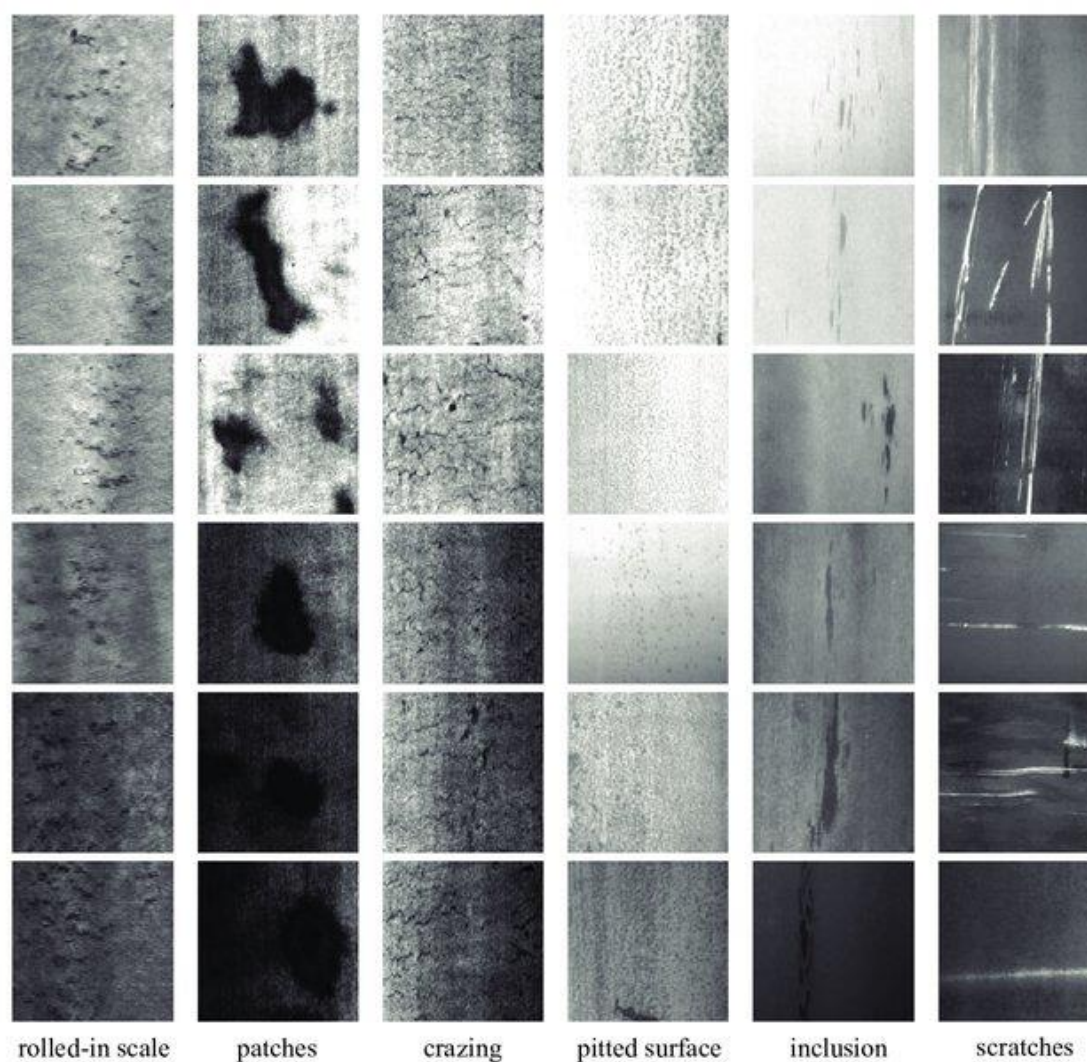


Рисунок 6 - Зображення 6 різних дефектів металопрокату

Приклад зображення, отриманого в ході аугментації наведено на рисунку 7.

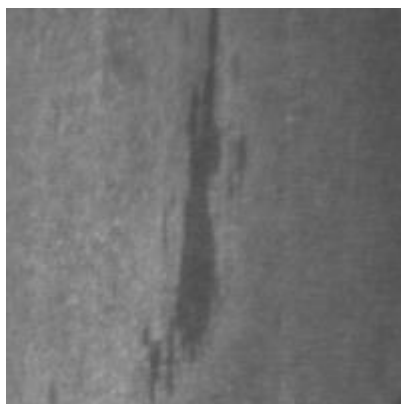


Рисунок 7- Приклад зображення, отриманого в ході аугментації

Крім аугментації, необхідно було також розподілити дата сет на навчальну, валідаційну та тестову вибірки. Тому всі отримані зображення були розподілені на зазначені вибірки у наступному відповідної пропорції – 75/15/15 % кожного типу дефектів.

Обчислювальні експерименти.

У процесі проведення експериментів змінювалися різні параметри моделей, зокрема параметри, що впливають аугментацію даних. Крім того, важливим параметром був розмір батча - розмір підмножини об'єктів вибірок, що вибираються для оптимізації моделі в процесі навчання, який також впливає на швидкість навчання: чим більший розмір батча, тим швидше нейронна мережа навчається, але при цьому може втрачатися точність моделі цієї мережі. У цьому роботі застосовувалися розміри: 1, 8, 16 і 32.

Для опису результатів наводяться графіки точності моделей у процесі навчання на тренувальній та валідаційній вибірках, а також функція втрат цих моделей.

Функція втрат – це функція, яка мінімізується у процесі навчання (підгонки) моделі. Вона представляє обрану міру незгоди даних і даних, що «спостерігаються», «передбачуваних» підігнаною функцією. Іншими словами - відмінність отриманого результату від дійсного. Відповідно, що менше значення функції втрат, то краще модель дає результати.

Для наочності, на графіках представлено 2 лінії: дійсна функція (прозора лінія) і згладжена версія цієї функції з коефіцієнтом згладжування (factor) рівним 0.6 (не прозора лінія). Функція згладжування є лінійною функцією, реалізованою в TensorBoard [11]:

$$smoothed(y_i) = \begin{cases} y_i & \text{if } i = 0 \\ y_{i-1} * factor + (1 - factor) * y_i & \text{if } i > 0, i = [0, n). \end{cases} \quad (1)$$

Оскільки рання зупинка процесу навчання не розглядалася, через наявність необхідних обчислювальних ресурсів, всі моделі навчалися протягом 500 епох, основні результати наводяться за 100 епох.

На рисунку 8 наведено графіки процесу навчання: для моделі AFDC_BC графіки зліва та для моделі AFDC_IV3 – справа. Верхній графік показує точність

моделей на навчальній вибірці, середній – функцію втрат та нижній – точність класифікації за валідаційною вибіркою. За графіками видно, що модель на базі InceptionV3 мала значну різницю точно на валідаційній вибірці залежно від епохи навчання та ця точність досягала пороги понад 90%. Якщо говорити про модель на базі простої згорткової мережі, то тут процес навчання йшов гладкіше - точність на вибірці валідації не мала особливих стрибків. Однак, ця модель не зуміла переступити поріг у необхідні 90%.

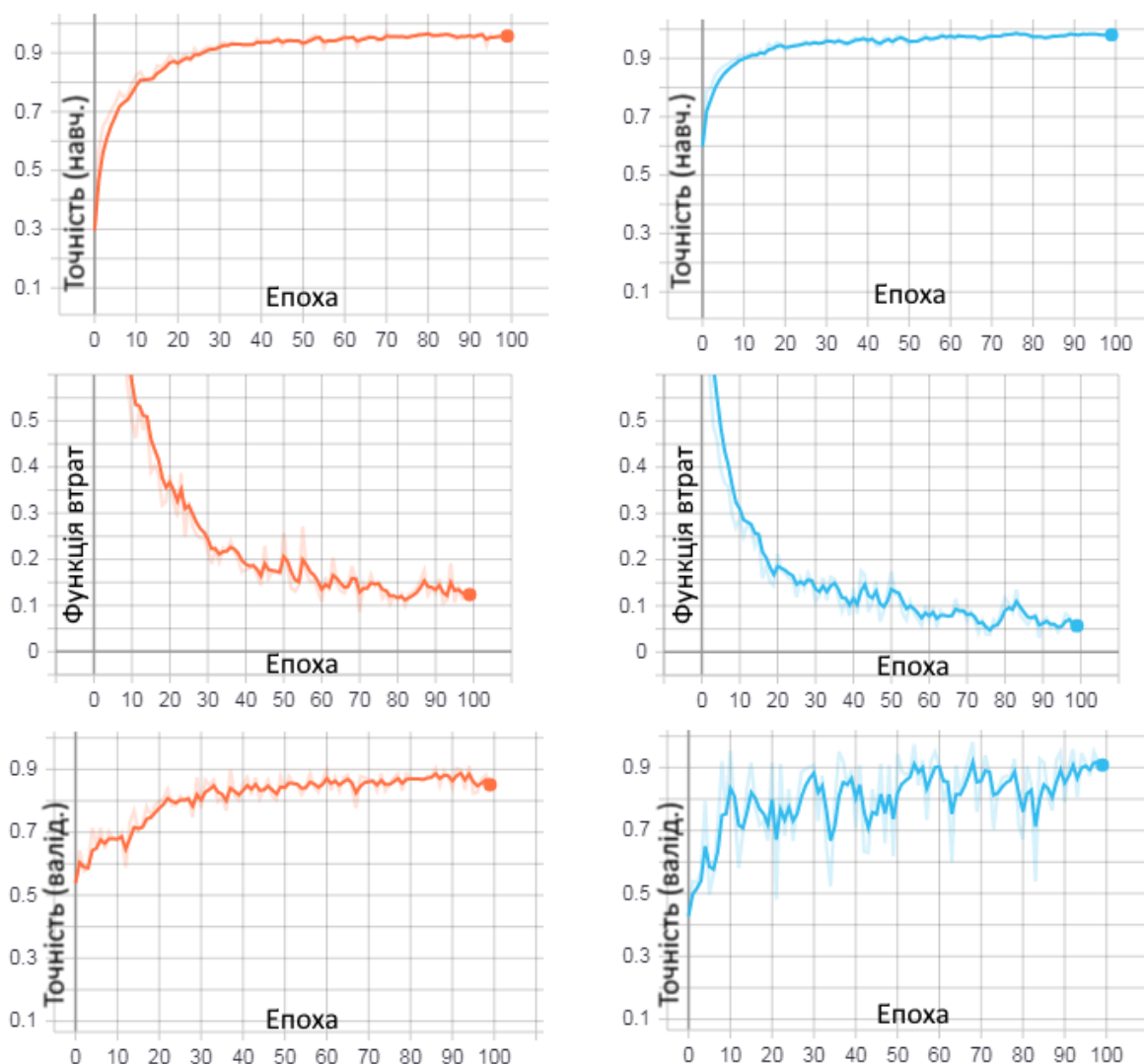


Рисунок 8 - Графіки процесу навчання моделей:
ліворуч – AFDC_BC, праворуч – AFDC_IV3

Слід зазначити, що зміна значень функції втрат цих моделей загалом відповідає оцінці точності на валидаційній вибірці.

На рисунку 9 наводяться графіки, аналогічні описаним раніше, але для моделей AFDC_MN – ліворуч і AFDC_MNV2 – праворуч. За даними графіками можна зробити описані далі висновки.

1. Модель на базі MobileNet мала відмінну точність на валидаційній вибірці на всіх епохах навчання, періодично досягаючи максимуму 100%;

2. Модель на базі MobileNetV2 мала значні коливання в процесі навчання, але все ж таки не раз досягла точності в 99%.

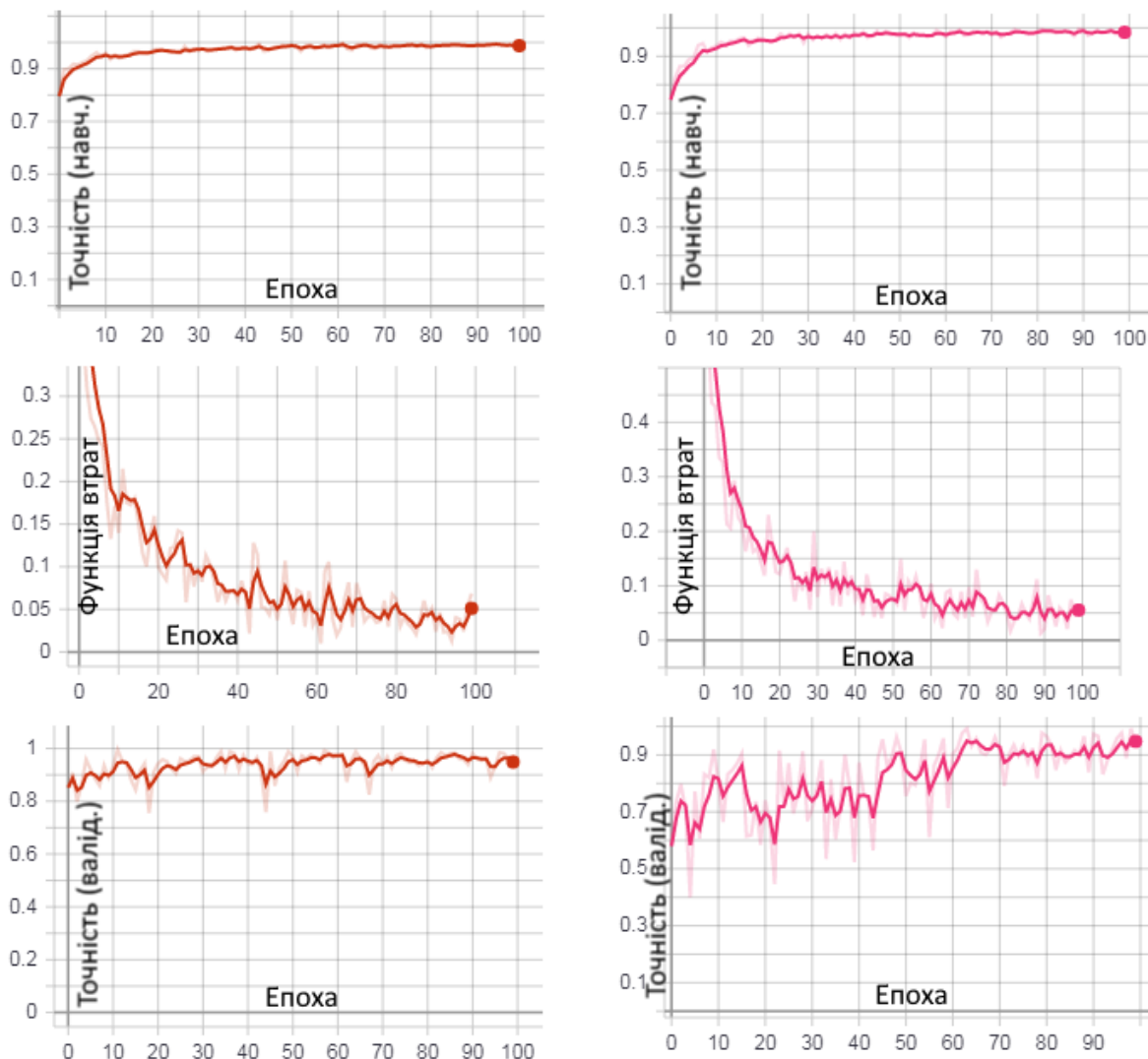


Рисунок 9 - Графіки процесу навчання моделей: ліворуч – AFDC_MN, праворуч – AFDCMN_V2

Таким чином, завдання отримання моделі класифікації дефектів з точністю вище 90% успішно виконано.

Висновки

Мета полягала у розробці програмної системи для класифікації дефектів металопрокату на базі нейромережових технологій, здатну менш ніж за 1 з часу виконувати класифікацію дефекту на зображенні з точністю не менше 90%. Для досягнення мети в рамках даної роботи було виконано такі завдання:

- 1) виконано дослідження предметної галузі, визначено можливість використання нейронних мереж для вирішення задачі класифікації дефектів металопрокату;
- 2) побудовано модель нейронної мережі, що підходить для вирішення задачі класифікації видимих дефектів металопрокату;
- 3) виконано генерацію навчальної, тестової та валідаційної вибірок на основі бази даних дефектів поверхні гарячого металопрокату, наданої Північно-східним університетом (NEU), здійснено аугментацію згенерованих вибірок;
- 4) спроектована та реалізована система класифікації дефектів;
- 5) проведено обчислювальні експерименти.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Alkapov R.R. Automatic Visible Defect Detection and Classification System Prototype Development for Iron-and-Steel Works. / Alkapov R.R., Konyshev A.A., Vetoshkin N.A., Valkevich N.V., Kostenetskiy P.S. // 2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC). Chelyabinsk, November 13-15, 2018, IEEE, 2018. – P. 1-8.
2. Baidorf I. Optimizatsiya protsessa i kachestva korrozionnostoykoy polosy na osnove sistemy kontrolya poverhnostey. / Baidorf I., Anstots T., Eberle A., Ernenpuch L., Holzhauser J. // Chernye Metalli, 2005. – Vol. 3. – P. 45-56.
3. Caleb P., Steuer M. Classification of surface defects on hot rolled steel using adaptive learning methods. // Proceedings of the Fourth International Conference on Knowledge-Based Intelligent Engineering Systems and Allied Technologies, August 2000, Brighton, UK. IEEE, 2002. – Vol. 1. – P. 103-108.
4. Guifang W. Design of online surface inspection system of hot rolled strips. / Guifang W., Kwak H., Jang S., Xu K., Xu J. // 2008 IEEE International Conference on Automation and Logistics, 2008. – P. 2291-2295.
5. Lemon S. Avtomaticheskii osmotr poverhnosty polosy dlya obespecheniya sploshnogo kontrolya kachestva v linii. // Chernye Metalli, 2003. – Vol. 4. – P. 49-54.

6. Mazur I. Quality Control system for a hot-rolled metal surface // *Frattura ed Integrità Strutturale*, 2016. – Vol. 10. – No. 37. – P. 287-296.
7. Neogi N., Mohanta D., Dutta P. Review of vision-based steel surface inspection systems. // *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2014. – Vol. 2014. – No. 1. – P. 1-50.
8. Popat M., Barai S. Defect detection and classification using machine learning classifier. // *Proceeding of the 16th WCNDT 2004 - World Conference on NDT*, 2004. – P. 788-797.
9. Stolzenberg M. Sistemy osmotra poverhnosty listovoy staly: Rezultaty issledovaniy. / Stolzenberg M., Gruber K., Henkenmayer H., Joncourt K. // *Chernye Metalli*, 2002. – Vol. 12. – P. 40-48.
10. Vetoshkin N., Valkevich N., Kostenetskiy P. Razrabotka polzovatelskogo interfeysa dlya sistemy avtomaticheskogo kontrolya kachestva poverhnosty listovoy staly s pokrytiem. // *Parallel Computational Technologies (PCT'2018)*, 2018. – P. 400-402.
11. TensorBoard: Visualizing Learning [Electronic resource]
URL: https://www.tensorflow.org/guide/summaries_and_tensorboard

Received 06.01.2023.

Accepted 08.02.2023.

UDC 004.942:681.3.068

K. Ostrovska, V. Balakin, S. Cherskyi

THE USE OF NEURAL NETWORK TECHNOLOGIES TO SOLVE THE PROBLEM OF CLASSIFICATION OF ROLLED METAL DEFECTS

The main goal of the work is to create a software system that performs the classification of rolled metal surface defects with high accuracy (over 90%) and high speed (no more than 1 second per 1 image) through the use of artificial neural networks. To achieve the goal, it is necessary to perform the following tasks: 1) perform a study of the subject industry, determine the possibility of using neural networks to solve the problem of classifying rolled metal defects; 2) build a neural network model suitable for solving the problem of classifying visible defects in rolled metal products; 3) generate training, test and validation samples based on the database of hot rolled metal surface defects provided by Northeastern University (NEU); perform augmentation of the generated samples; 4) design and implement a defect classification system; 5) conduct testing and computational experiments. As a result of the work, a software system was developed for the classification of rolled metal defects based on neural network technologies, which is capable of classifying a defect in an image with an accuracy of at least 90% in less than 1 s of time.

Keywords: Neural network, software system, classification, defect, rolled metal, augmentation, API, web interface, REST, MobileNet, InceptionV3, Python, Django web/rest framework, JavaScript, Bootstrap, dataset, dataset.

Островська Катерина Юріївна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Інформаційних технологій і систем НІІ Інститут промислових та бізнес технологій, Українського державного університету науки та технологій.

Балакін Валерій Федорович, доктор технічних наук, професор НІІ Інститут промислових та бізнес технологій, Українського державного університету науки та технологій.

Черський Сергій Сергійович, магістр кафедри Інформаційних технологій і систем НІІ Інститут промислових та бізнес технологій, Українського державного університету науки та технологій.

Ostrovska Kateryna, candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of Information Technologies and Systems of the National Institute of Industrial and Business Technologies, Ukrainian State University of Science and Technology.

Balakin Valerii, doctor of technical sciences, professor Systems of the National Institute of Industrial and Business Technologies, Ukrainian State University of Science and Technology.

Cherskyi Serhii, Master of the Department of Information Technologies and Systems of the National Institute of Industrial and Business Technologies, Ukrainian State University of Science and Technology.

DOI: 10.34185/1991-7848.2023.01.11

УДК 669.187; 621.365.22

С.М. Тімошенко, Е.М. Немцев, М.В. Губинський

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ РІШЕННЯ ЩОДО РАФІНУВАННЯ СТАЛІ В ЕЛЕКТРОДУГОВІЙ ПЕЧІ ЛИВАРНОГО КЛАСУ

Анотація. Проведено чисельне моделювання кінетики десульфурації сталі в 3–12 т дугових сталеплавильних печах (ДСП) ливарного класу. У «глибокій» сталеплавильній ванні з коефіцієнтом форми 2,5 та пневматичним перемішуванням швидкість видалення сірки збільшується в 5–6,7 разів, порівняно зі стандартною ванною з коефіцієнтом форми 4,5 без перемішування, за рахунок інтенсифікації масообміну в двофазній області та розвитку плівкової десульфурації. Внесок поглиблення ванни у прискорення видалення сірки становить у середньому 23%. Отримані результати дозволяють очікувати скорочення технологічного періоду в середньому в 1,5 рази, а плавки в цілому на 8–10 %. Економія електроенергії в ДСП малої місткості ливарного класу очікується 60–70 кВтг/т.

Ключові слова: дугова сталеплавильна піч, енергоефективність, «глибока» ванна, десульфурація, пневматичне перемішування.

Вступ

Дугові сталеплавильні печі (ДСП) забезпечують близько 30% світового виробництва рідкої сталі, включаючи ливарні цехи. На відміну від двостадійної технології «великої» металургії з позапічною доводкою сталі [1, 2], у ливарному виробництві рафінування, зокрема видалення сірки, здійснюється безпосередньо в ДСП.

Десульфурація сталі в ряді випадків є, з позицій кінетики, обмежуючою ланкою технології плавки. Потік сірки зі сталі в шлак J (кг/с) визначається [2] коефіцієнтом масопереносу β (м/с), поверхнею розділу метал-шлак F (м²) та вмістом сірки (кг/м³) у металі $[S]$ й шлаку (S) .

$$J = \beta \cdot F([S] - (S)). \quad (1)$$

Відповідно до рівняння (1), розвинена міжфазна поверхня сприяє десульфурзації, що відображено в традиційних уявленнях про неглибоку плоску ванну ДСП із коефіцієнтом форми (відношення діаметра до глибини) $m = 4,5-5,5$. Однак ковшові сталеплавильні агрегати «великої» металургії мають «глибоку» ванну з $m = 0,8-1,1$. Необхідне значення J в умовах зниженого F забезпечується збільшенням β за рахунок примусового перемішування. Однак, відомі математичні моделі видалення сірки не враховують вплив гідродинамічних факторів за рахунок поглиблення сталеплавильної ванни такого ж об'єму.

Енергоємна класична технологія, низька питома потужність трансформатора в поєднанні з нерегулярністю роботи, обмежені можливості перемішування ванни, утилізації втрат теплоти і диверсифікації джерел енергозабезпечення зумовлюють значно меншу енергоефективність ДСП ливарного класу в порівнянні з агрегатами «великої» металургії.

Потребують додаткових досліджень питання кінетики десульфурзації сталі в умовах ДСП ливарного класу при переході від стандартної до «глибокої» ванни [3, 4]. З урахуванням зменшення міжфазної поверхні метал-шлак і пневматичного перемішування.

Мета роботи – методом чисельного моделювання дослідити вплив коефіцієнта форми сталеплавильної ванни ДСП ливарного класу на енергоефективність технологічного періоду плавки на прикладі десульфурзації сталі в умовах примусового перемішування.

Моделювання

Схема, що відображає геометрію ванни, режим пневматичного перемішування та гідродинаміку розплаву щодо кінетики десульфурзації сталі в ДСП, наведена на рис. 1.

Дослідження масопереносу сірки в системі сталь-шлак в контексті геометрії ванни проводили на основі критеріального рівняння, отриманого J. Meitz, S. Schneider і F. Oeters [5]:

$$Sh = 2 + 0,511 \cdot Re^{0,724} \cdot Sc^{0,70}, \quad (2)$$

де $Sh = \beta \cdot L / D_s$ – число Шервуда; β – коефіцієнт масопереносу сірки, м/с; L – характерний розмір, м; D_s – коефіцієнт дифузії сірки в рідкій сталі, м²/с; $Re = u \cdot L / \nu$ – число Рейнольдса; u – швидкість руху, м/с; ν – кінематична в'язкість рідкої сталі, м²/с; $Sc = \nu / D_s$ – число Шмідта.

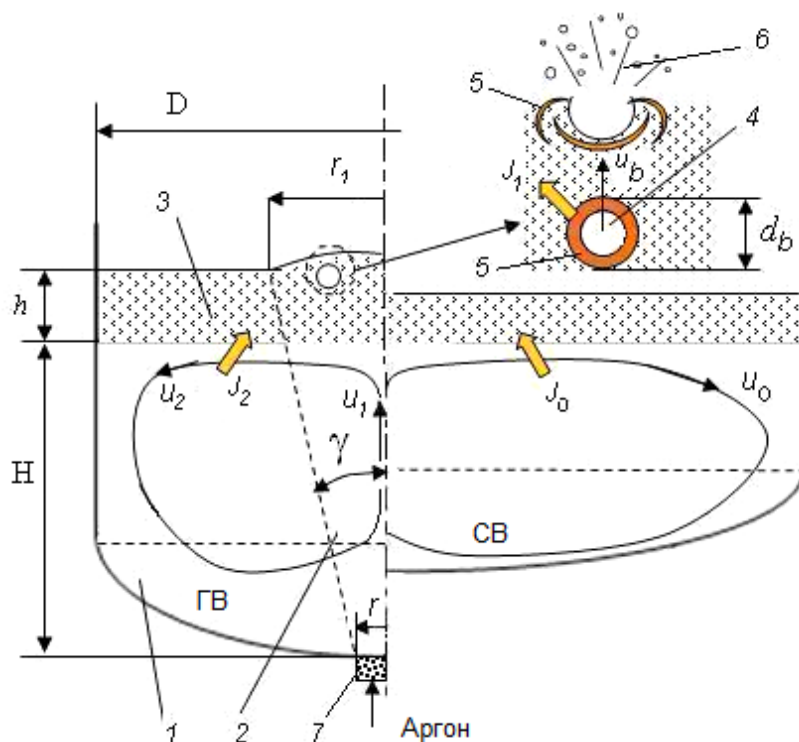


Рисунок 1 – Схема процесу десульфурації в ДСП зі стандартною (СВ) і «глибокою» (ГВ) ванною з пневматичним перемішуванням:

- 1 – рідка сталь, 2 – двофазна область, 3 – шлак, 4 – бульбашка,
5 – сталева плівка, 6 – бризки плавильного пилю,
7 – пориста пробка (буквені позначення у тексті)

У рамках моделі процес десульфурації в ДСП включає шлакоутворення та пневматичне перемішування розплаву продувкою аргоном з витратою Q (м³/с) через пористу пробку радіусом r , встановлену аксіально в днищі. У процесі барботажу в рідкому розплаві утворюється двофазна область з кутом розкриття γ і радіусом вихідної плями r_1 . Двофазна область за рахунок меншої щільності ініціює циркуляцію у ванні діаметром D (м) і глибиною H (м). Передбачаються два види течій з різною інтенсивністю тепломасообмінних процесів: у двофазній області та на периферії ванни з середніми швидкостями u_1 та u_2 (м/с) згідно з D. Mazumdar і R. Guthrie [6]:

$$u_1 = 4,5 \cdot Q^{0,33} \cdot H^{0,25} / (D/2)^{0,33}, \quad (3)$$

$$u_2 = 0,79 \cdot Q^{0,33} \cdot H^{0,25} / (D/2)^{0,67}, \quad (4)$$

Особливістю десульфурації в умовах пневматичного перемішування є розвиток процесу на сталевих плівках (рис. 1), що переносяться в шлак на поверхні бульбашок інертного газу, наявність яких при ковшовій обробці сталі з дуговим нагрівом експериментально показали Z. Han і L. Holappa [7]. Незначна частина заліза втрачається з виділенням пилу плавки.

Внесок плівкової десульфурації в процес в цілому в ДСП раніше не вивчали. Завдання полягає в оцінці коефіцієнта масопереносу сірки за рівнянням (2) та загальної поверхні бульбашок у шлаку, як величин, що визначають кінетику десульфурації сталі, за рівнянням (1), з урахуванням режимних параметрів обробки сталі, геометрії та гідродинаміки ванни.

Для середніх значень еквівалентного діаметра d_b (м) і швидкості підйому бульбашки в рідкій сталі u_b (м/с) скористаємось емпіричними залежностями [8]:

$$d_b = 0,35 \cdot \left[(\alpha \cdot Q)^2 / g \right]^{0,2}, \quad (5)$$

$$u_b = 1,02 \cdot \sqrt{g \cdot (d_b / 2)}, \quad (6)$$

де Q – витрата газу, м³/с; α – коефіцієнт перерахунку Q на робочі умови; g – прискорення сили тяжіння, м/с².

Основні параметри двофазної області (розглядається зрізаний зворотний конус) – вміст газу ϕ та кут розкриття γ (град), визначені G.Krishnamurthy, S. Mehrotra і A. Ghosh [9, 10]:

$$\gamma = 82,35 \cdot Fr_m^{0,12} \cdot (H/D)^{-0,254} \cdot (2r/D)^{0,441}, \quad (7)$$

$$\phi = (\alpha \cdot Q \cdot H / u_b) / V, \quad (8)$$

де $Fr_m = \frac{\alpha Q / (\delta \cdot \pi \cdot r^2)}{g \cdot H} (\rho_g / \rho)$ – модифіковане число Фруда;

$V = \frac{\pi}{3} (r_1^2 + r \cdot r_1 + r^2)$ – об'єм двофазної області, м³; δ – відкрита пористість пробки; ρ_g, ρ – щільність відповідно газу та рідкої сталі, кг/м³.

Оцінку сумарної поверхні бульбашок інертного газу F_1 в шлаку проведено на основі рівнянь (7 і 8) в припущенні бульбашкового режиму продувки, сферичної форми бульбашок і достатньо тонкої сталевий плівки на них. Двофазна область у шлаку має умовний радіус та висоту (м): $r_1 = r + H \cdot \operatorname{tg}(\gamma)$ і h (рис. 1). Маса шлаку, необхідна для десульфурації сталі, складає (кг): $M_{sl} = [M \cdot 10^3 ([S]_0 - [S]_t)] / [(L_s [S]_t - 0,01(S)_{CaO} \cdot \eta_{CaO}]$. Даний параметр визначається через місткість ДСП M (т), початковий $[S]_0$ і перед випуском $[S]_t$ вміст сірки в сталі (мас. %), коефіцієнт розподілу сірки між шлаком і металом $L_s = (S)/[S]_t$, частку вапна в шлаку η_{CaO} , вміст сірки у вапні $(S)_{CaO}$ (мас.%). Висота шлакової ванни, що має щільність ρ_{sl} (кг/м³), складає $h = M_{sl} / (\rho_{sl} \cdot \pi \cdot D^2 / 4)$ (м).

Вирази для вхідних параметрів рівнянь (1–8), в рамках розв’язування задачі, наведено в табл. 1. Швидкість видалення сірки зі сталі в шлак у «глибокій» ванні, що перемішується, включає дві складові J_1 та J_2 . Вони характеризують різну за гідродинамікою двофазну область (J_1) і периферію (J_2). У стандартній ванні без примусового перемішування, відповідне значення J_0 вважається постійним на міжфазній поверхні F_0 .

Вміст сірки в шлаку (S) , не зв’язаної у (CaS) при роботі з постійним оновленням шлаку вважається близьким до 0. Тому оцінка швидкості видалення сірки J на основі рівняння (1) передбачає середню різницю вмісту сірки між сталлю та шлаком у процесі рафінування (мас. %): $\Delta S = ([S]_0 + [S]_m) / 2$.

З позицій геометрії дано оцінку максимальному значенню вмісту газу в двофазній області $\varphi_m = \pi/6$, при якому починається процес коалесценції бульбашок, що супроводжується зміною реагуючої міжфазної поверхні F_1 від максимальної при φ_m до мінімальної, що прагне до πr_1^2 , при $\varphi_u = 1$. Значення граничної витрати інертного газу, відповідно φ_m і φ_u , були оцінені з рівняння (8) з урахуванням (5)–(7) і охарактеризовані як максимальне Q_m і кінцеве Q_u , відповідно. Модель, для простоти, з точки зору порівняльної оцінки, припускає лінійну зміну реагуючої поверхні F_1 в межах швидкості потоку Q_m і Q_u .

Таблиця 1

Вирази для вхідних параметрів при розрахунку кінетики видалення сірки

Параметр	Вираз щодо стандартної ванни	Вираз щодо "глибокої" ванни з перемішуванням	
		Двофазна область	Периферія
Характерний розмір, м	D	r_1	$D - r_1$
Характерна швидкість, м/с	$u_0 \approx 0,05$ за [11]	u_1 за рівнянням (3)	u_2 за рівнянням (4)
Коефіцієнт масопереносу сірки, м/с	$\beta_0 = Sh \cdot D_S / D$	$\beta_1 = Sh \cdot D_S / r_1$	$\beta_2 = Sh \cdot D_S / (D - 2r_1)$
Міжфазна поверхня, м ²	$F_0 = \pi D^2 / 4$	$F_1 = 6\pi \cdot r_1^2 \cdot h \cdot \phi / d_b$	$F_2 = \pi [D^2 / 4 - r_1^2]$
Швидкість видалення сірки, кг/с	$J_0 = \frac{\beta_0 \cdot F_0 \cdot \Delta S \cdot \rho}{100}$	$J_1 = \frac{\beta_1 \cdot F_1 \cdot \Delta S \cdot \rho}{100}$	$J_2 = \frac{\beta_2 \cdot F_2 \cdot \Delta S \cdot \rho}{100}$
		$J = J_1 + J_2$	

У стандартній ванні без примусового перемішування рух розплаву зумовлено тепловою конвекцією від гарячих зон під дугами і характеризується середньою швидкістю u_0 за даними досліджень O.Gonsalez, M. Ramirez-Argaez, A. Conejo [11] (табл.1).

Моделювання проводили в пакеті прикладних програм Mathcad. Завдання полягало в порівняльній оцінці потоку сірки з металу в шлак в ДСП зі стандартною і «глибокою» ванною. Формули, наведені в табл. 1, використовуються з урахуванням виразів (2)–(8) і припущень, зроблених у моделі.

Вхідні параметри: $D_S = 4,38 \cdot 10^{-9}$ м²/с [2], $L_S = 43$ для конструкційної сталі, розкисленої алюмінієм [10], $[S]_0 = 0,060$, $[S]_t = 0,025$ %, $\nu = 1,0 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $\rho = 7000$ кг/м³, $\rho_{сл} = 3100$ кг/м³, $\rho_g = 1,63$ кг/м³, $\eta_{CaO} = 0,44$, $(S)_{CaO} = 4$ %, температура ванни $T_b = 1853$ К, радіус пробки $r = 0,03$ – $0,06$ м, відкрита пористість пробки $\delta = 0,3$. Стандартний коефіцієнт форми ванни m становить 4,5. Для «глибокої» ванни m дорівнює 2,5 за умов мінімізації втрат теплоти випромінюванням через водоохолоджувані панелі, враховуючи зростання радіаційного внеску поверхні електродів зі зменшенням m та конструктивні обмеження [3]. Параметри ванни D , H (циліндрично-сферичне тіло заданого місткістю ДСП об'єму зі співвідношенням по висоті 1:1) наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Параметри геометрії ванни ДСП

Місткість ДСП, M , т	Геометрія ванни, м			
	Стандартна		«Глибока»	
	D	H	D	H
3	1,53	0,34	1,25	0,50
6	1,93	0,43	1,58	0,63
12	2,43	0,54	1,99	0,80

Результати й обговорення

Внесок плівкової десульфурзації в загальний процес видалення сірки виражається співвідношеннями F_1/F_0 і β_1/β_0 (табл. 1). Залежності цих параметрів від витрати інертного газу та коефіцієнта форми ванни представлено на рис. 2.

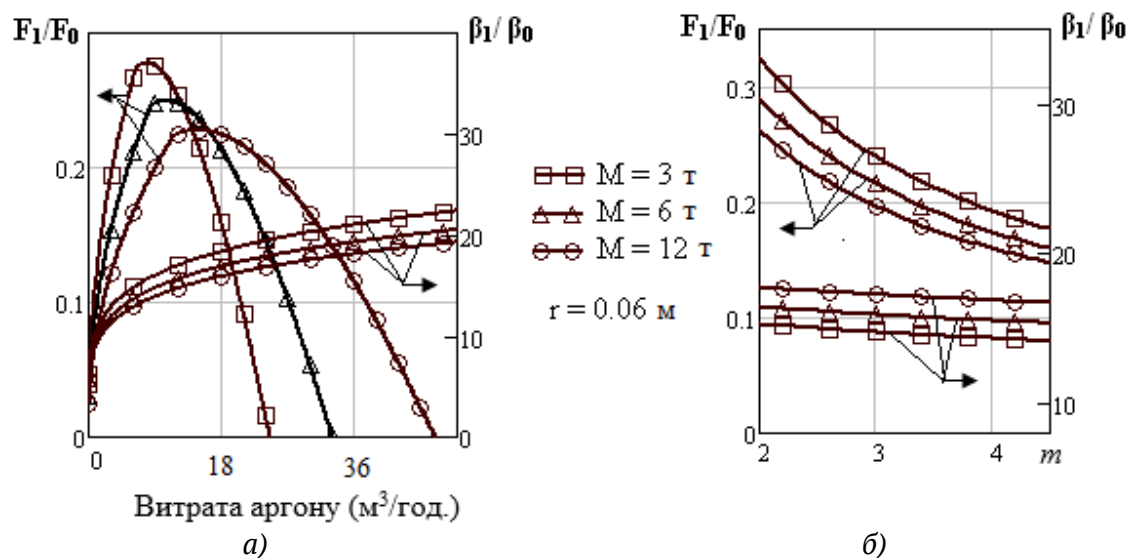


Рисунок 2 – Показники внеску плівкової десульфурзації F_1/F_0 , β_1/β_0 у загальний процес видалення сірки, в залежності від витрати аргону (а) і коефіцієнта форми ванни m при пороговій витраті аргону Q_m (б) (буквені позначення в тексті)

У «глибокій» ванні (рис. 2а) відношення F_1/F_0 збільшується зі зростанням швидкості продувки газом, досягаючи максимуму 0,23–0,28 при Q_m , при цьому β_1 перевищує β_0 щонайменше в 10–20 разів із тенденцією до зростання співвідношення β_1/β_0 зі збільшенням витрати інертного газу. При $Q > Q_m$ відбувається перехід до бульбашково-струминного режиму зі спадом F_1/F_0 . При $Q = Q_u$ відбувається «пробій» ванни з різким зменшенням міжфазної поверхні металошлаку до площі вихідної плями видудання πr_l^2 .

В умовах пневматичного перемішування (рис. 2б) зменшення коефіцієнта форми ванни з 4,5 до 2,5 призводить до підвищення як F_1/F_0 , так і β_1/β_0 на 47–56% та 8–14%, відповідно. При цьому внесок від зростання β_1/β_0 більше проявляється у ДСП більшої місткості, а внесок від збільшення F_1/F_0 – у ДСП меншої місткості.

Співвідношення $\varepsilon_J = J/J_0$ (табл. 1) характеризує порівняльну ефективність видалення сірки в «глибокій» ванні з продувкою інертним газом і стандартній ванні без примусового перемішування. Отримані результати, залежно від режиму та геометричних параметрів обробки сталі, наведено на рис. 3.

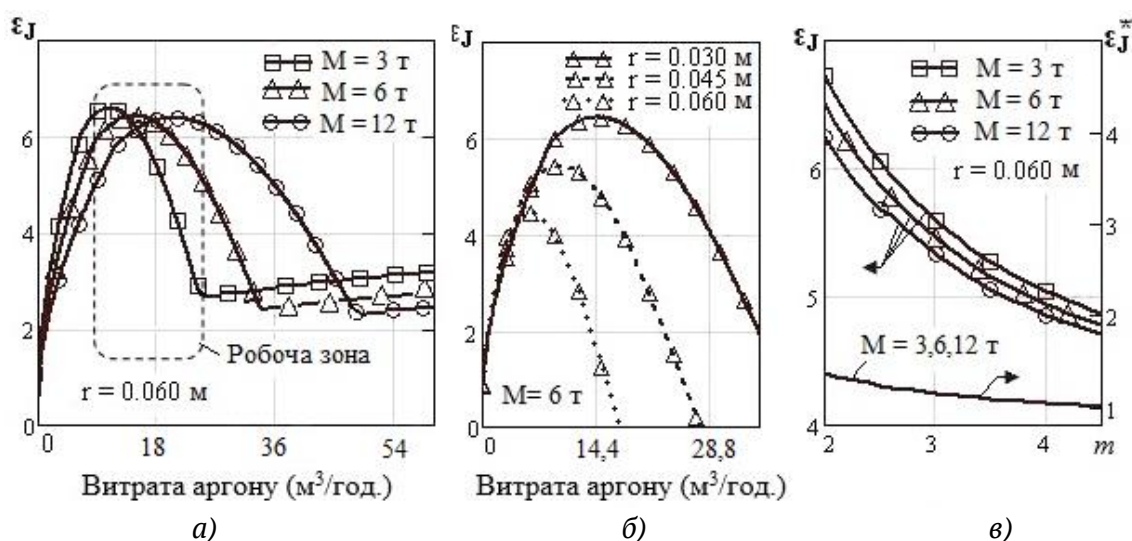


Рисунок 3 – Співвідношення ефективності десульфурації в «глибокій» і стандартній ванні ε_J , включаючи умовний випадок перемішування стандартної ванни ε_J^* , від витрати аргону (а, б), радіуса пористої пробки (б) і коефіцієнта форми ванни m при пороговій витраті аргону Q_m (в) (буквені позначення в тексті)

Для розглянутої групи ДСП максимальне значення ε_J становить 5–6,7 при оптимальній витраті аргону $Q_{opt} = 11–23$ м³/год. (рис. 3а). Робоча зона Q_{opt} має тенденцію до зростання зі збільшенням місткості ДСП і діаметра пористої пробки. Через неоднозначний вплив інтенсивності продувки на реакційну поверхню та коефіцієнт масопереносу сірки, а також враховуючи специфіку масообміну на периферії ванни, значення оптимальної витрати аргону знаходиться в діапазоні: $Q_m \leq Q_{opt} < Q_u$.

При $Q \geq Q_u$ внесок плівкової десульфурації різко зменшується, а деяке зростання ε_J пов'язане з інтенсифікацією масообміну на периферійній

міжфазній поверхні сталь-шлак. Такий режим продувки не є оптимальним з точки зору термодинаміки видалення сірки та для процесу рафінування сталі в цілому через підвищення окислення металу за рахунок припливу навколишнього повітря на оголену поверхню ванни над пористою пробкою.

Збільшення радіуса пористої пробки r зміщує порогові значення Q_m і Q_u у бік вищих витрат і сприяє збільшенню ε_f (рис. 3б). Показник ε_f^* є аналогічним ε_f , але відноситься до випадку умовної стандартної ванни з продувкою інертним газом та введений для виявлення ефекту зменшення коефіцієнта форми. Розрахунковий внесок поглиблення ванни від $m = 4,5$ до $2,5$ у зростання швидкості видалення сірки, для розглянутої групи ДСП, становить у середньому 23 % (рис. 3в).

Таким чином, оптимальне поєднання витрати аргону та розміру пористої пробки є необхідною умовою для ефективної десульфурзації сталі в ДСП ливарного класу з «глибокою» ванною. Проте слід враховувати механічне послаблення та посилення ерозії подини печі зі зростанням r .

В рамках моделі тривалість десульфурзації сталі τ_s (хв) виражається наступним чином:

$$\tau_s = ([S]_0 - [S]_t) \cdot 600 \cdot M / I, \quad (9)$$

Отримані значення τ_s порівнювали з оцінками часу десульфурзації τ_s^* (хв), виходячи з концепції, що зв'язує швидкість видалення сірки з потужністю перемішування N_{mix} , що розсіюється в сталеплавильній ванні [12]. Для випадку $N_{mix} > 70$ Вт/т, що, за попередніми оцінками, відповідає робочій зоні витрати інертного газу в розглянутій групі печей, ця залежність має вигляд:

$$\tau_s^* = \frac{\ln \left\{ ([S]_t / [S]_0) \cdot [1 + M / (L_S M_{s1})] - M / (L_S M_{s1}) \right\}}{-8 \cdot 10^{-6} \cdot N_{mix}^{2,1} \cdot [1 + M / (L_S M_{s1})]}, \quad (10)$$

Для пневматичного перемішування значення N_{mix} (Вт/т) визначається роботою ізотермічного розширення бульбашок інертного газу проти сил тертя за одиницю часу:

$$N_{mix} = [\rho_g \cdot Q \cdot R \cdot T \cdot \ln(1 + H / 1,48)] / (\mu \cdot M), \quad (11)$$

де R – універсальна газова стала, Дж/кмоль·К; T – температура ванни, К; 1,48 – гідростатична висота стовпа рідкої сталі, м; μ – молекулярна маса інертного газу, кг/кмоль.

Результати порівняльної оцінки часу десульфурації τ_s і τ_s^* у залежності від витрати інертного газу наведено на рис. 4. Певна відповідність порівнюваних величин спостерігається біля нижньої межі робочої зони витрати інертного газу. Значна розбіжність між досліджуваними параметрами пояснюється особливостями запропонованої моделі, яка при низьких витратах інертного газу враховує внесок теплової конвекції у ванні ДСП у десульфурацію, а при високих витратах – зниження ефективності плівкової десульфурації через коалесценцію бульбашок. Крім того, розглянута модель більш адекватно відображає ефект «пробою» ванни, що призводить до збільшення τ_s при $Q \geq Q_{cr}$, що при заданому Q спочатку проявляється в ДСП меншої ємності.

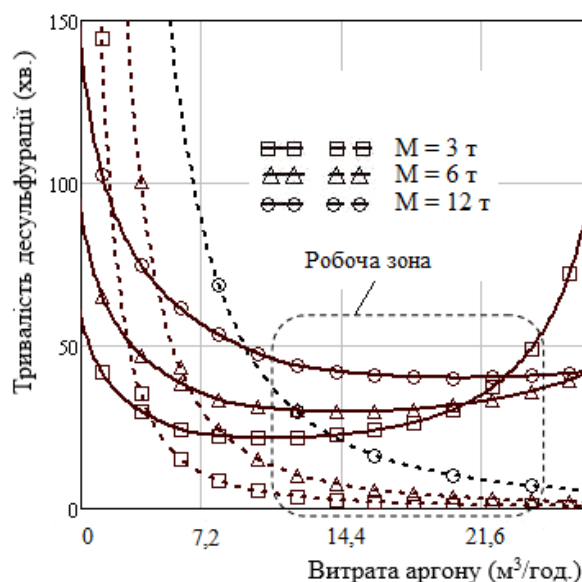


Рисунок 4 – Залежність часу десульфурації в сталеплавильній ванні з пневматичним перемішуванням від витрати інертного газу відповідно до моделі τ_s (суцільні лінії) та оцінкам τ_s^* за [12] (пунктирні лінії)

На основі даних чисельного моделювання, в ДСП з «глибокою» ванною потужність перемішування для розглянутих варіантів збільшується в 1,3–2 рази у порівнянні з базовою ванною. Згідно [1] при цьому слід очікувати скорочення технологічного періоду за умов, що він лімітується процесами видалення сірки в середньому в 1,5 рази. З огляду на частку періоду доводки в загальній тривалості плавки в середньому 25–30 %, скорочення часу плавки складе 8–10

%, а економія електроенергії, при середній питомій витраті в дугових печах малої місткості 850 кВтг/т, очікується 60–70 кВтг/т.

Висновки

Розроблено математичну модель кінетики десульфурації сталі в 3–12 т ДСП ливарного класу з урахуванням плівкової десульфурації, геометрії та гідродинаміки ванни та двофазної області, теплової конвекції та коалесценції бульбашок.

У «глибокій» сталеплавильній ванні з коефіцієнтом форми 2,5 та пневматичним перемішуванням швидкість видалення сірки збільшується в 5–6,7 разів порівняно зі стандартною ванною з коефіцієнтом форми 4,5 без перемішування за рахунок інтенсифікації масообміну в двофазній області та розвитку плівкової десульфурації, що становить до 23–28 % у загальному процесі. Вплив геометрії ванни з примусовим перемішуванням на видалення сірки більш помітний у ДСП меншої місткості.

Збільшення радіуса пористої пробки в межах 0,03–0,06 м при оптимальній витраті інертного газу 11–23 м³/год. сприяє збільшенню швидкості виносу сірки за рахунок підвищення порогових витрат, що відповідають переходу від бульбашкового режиму до бульбашково-струменевого режиму і до «поломки» банного режиму. Вплив поглиблення ванни на прискорення видалення сірки становить у середньому 23%.

Отримані результати дозволяють очікувати скорочення технологічного періоду за умов, що він лімітується процесами видалення сірки в середньому в 1,5 рази. З огляду на частку періоду доводки в загальній тривалості плавки в середньому 25–30 %, скорочення часу плавки складе 8–10 %, а економія електроенергії, при середній питомій витраті в дугових печах малої місткості 850 кВтг/т, очікується у розмірі 60–70 кВтг/т.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Yu. Toulouevski, I. Zinurov. Innovation in Electric Arc Furnaces. Scientific Basis for Selection. Berlin: Springer-Verlag, 2010, 258 p.
2. C. Zhu, P. Chen, G. Li, X. Luo, W. Zheng. A Mathematical Model of Desulphurisation Kinetics for Ultra-low sulphur Steels Refining by Powder Injection during RH Processing. ISIJ International, Vol. 56, 2016, p. 1368–1377.

3. S. Timoshenko, Energy efficient solutions for small capacity electric arc furnaces of a foundry class. Modern problems of metallurgy. Scientific news. Dnipro: NMetAU-IVK System Technologies, vol. 21, 2018, p. 73-80.
4. S. Timoshenko, A. Stovpchenko, Yu. Kostetski, M. Gubinski, Energy efficient solutions for EAF steelmaking. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, vol. 88, 2018, p. 18-24.
5. J. Meitz, S. Schneider, F. Oeters, Model experiments on mass transfer in ladle metallurgy. Steel research, vol. 62, 1991, p. 1-9.
6. D. Mazumdar, R. Guthrie, The Physical and Mathematical Modeling of Gas Stirred Ladle Systems. ISIJ International, vol. 35, 1995, p. 1-20.
7. Z. Han, L. Holappa, Mechanisms of Iron Entrainment into Slag due to Rising Gas Bubbles. ISIJ International, vol. 43, 2003, p. 292-297.
8. D. Mazumdar, J. Evans, Modeling of Steelmaking Processes. Boca Raton, London, New York: CRC Press, 2010, 463p.
9. A. Ghosh, Secondary Steelmaking. Principles and Applications. New York: CRC Press, 2000, 344p.
10. G. Krishnamurthy, S. Mehrotra, A. Ghosh, Experimental investigation of mixing phenomena in a gas stirred liquid bath. Metallurgical Transactions, vol. 19B, 1988, p. 839-850.
11. O. Gonzalez, M. Ramirez-Argaez, A. Conejo, Effect of arc length on fluid flow and mixing phenomena in AC electric arc furnaces. ISIJ International, vol. 50, 2010, p. 1-8.
12. E. Turkdogan, Fundamentals of Steelmaking. London: Maney Publishing, 2010, 331p.

Received 09.01.2023.

Accepted 16.02.2023.

UDC: 669.187; 621.365.22

S. Timoshenko, E. Niemtsev, M. Gubinskyi

ENERGY EFFICIENT SOLUTIONS FOR STEEL REFINING IN FOUNDRY CLASS ELECTRIC ARC FURNACE

Analysis of recent research and publications. The technological period in foundry class electric arc furnaces (EAF) is usually long term, is determined by desulfurization of steel and accompanied by significant energy loss through emissive surface of shallow steelmaking bath. Known mathematical models of Sulphur removal do not take into attention the impact of hydrodynamics factors due to deepening of the steelmaking bath of the same volume.

Purpose. The task is to show feasibility of energy savings in foundry class EAF due to implementation of “deep” bath with forced pneumatic mixing.

Method. Numerical modeling of sulfur removal in the steelmaking bath under conditions of forced pneumatic mixing,

Research findings. Mathematical model takes into account removal of sulfur on interfacial surface of thin steel film, covering gas bubbles, geometry of bath and two-phase region, hydrodynamics, coalescence of bubbles. Simulation showed that in a “deep” bath,

having shape factor (diameter to depth ratio) 2.5, rate of desulfurization, increases up to 5-6.7 times compared with a standard not forcibly stirred bath with shape factor 4.5, due to amplification of mass transfer in two-phase region and film desulfurization, reaching at least 23-28 % in overall process. Rise of porous plug radius contributes to increase sulfur removal velocity due to enlargement of threshold flowrates, corresponding to transition bubble - jet mode and bath "breakdown" mode. Effect of bath deepening in overall improvement of desulfurization kinetics is on average 23%.

Practical significance. The obtained results allow to expect a shortening of the technological period due to increase of sulfur removal processes by an average of 1.5 times. Taking into account the share of the technological period in the total duration of melting on average 25-30%, the reduction of melting time will be 8-10%, and the saving of electricity, with an average specific consumption in small-capacity arc furnaces of 850 kWh/t, is expected to be 60-70 kWh per ton of crude steel.

Keywords: arc steelmaking furnace, energy efficiency, “deep” bath, desulfurization, pneumatic stirring.

Тимошенко Сергій Миколайович, професор кафедри електричної інженерії ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», д.т.н., с.н.с., stimoshenko155@gmail.com.

Нємцев Едуард Миколайович, ст. викладач кафедри електричної інженерії ДВНЗ “Донецький національний технічний університет”, eduard.niemtsev@donntu.edu.ua

Губинський Михайло Володимирович, провідний науковий співробітник. Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України», д.т.н., професор, gubinm58@gmail.com.

Timoshenko Sergii, Dr. of Sci. (Eng.), Donetsk National Technical University, professor, Luts'k, stimoshenko155@gmail.com.

Niemtsev Eduard, Donetsk National Technical University, Senior Instructor, Luts'k, eduard.niemtsev@donntu.edu.ua

Gubinskij Mikhail, Dr. of Sci. (Eng.), Institute of Ferrous Metallurgy named after Z.I. Nekrasov of NAS of Ukraine, professor, Dnipro, gubinm58@gmail.com

DOI: 10.34185/1991-7848.2023.01.12

УДК 669.1.061.6

Л.Г. Тубольцев, В.О. Петренко, А.М. Селегей

ПРОБЛЕМИ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОГО РОЗВИТКУ МЕТАЛУРГІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА

***Анотація.** Метою даної роботи є дослідження перспективних напрямів сталого розвитку чорної металургії України в сучасних умовах. Розглянуто основні напрямки стабілізації роботи галузі, що включають: вплив держави на розвиток металургійної галузі, проблеми удосконалення сортаменту металургійної продукції, науковий розвиток металургійних технологій, екологічні проблеми чорної металургії, проблеми наукового забезпечення розвитку металургійних технологій, основні напрямки науково-технічних рішень для сталого розвитку металургійного виробництва. Показано, що нині в національній державній політиці не враховуються головні показники розвитку країни – цільові установки, визначення та затвердження критеріїв і параметрів розвитку країни, гласність і контроль їх виконання. Таке становище потребує розроблення промислової політики у металургійній галузі. Аналіз показує, що в країні продовжує загострюватися проблема внутрішнього ринку металопродукції, скорочується сортамент ефективних видів металопродукції, країна все більше орієнтується на експорт сировинних видів металопродукції та напівфабрикатів. Відзначено, що науково-технічний супровід металургійної галузі має одним з основних чинників розвитку та ефективності виробництва. Використання результатів наукових досліджень є одним з головних чинників зменшення витрат енергоресурсів на виробництво металопродукції. Відзначено, що екологічні проблеми можуть вкрай негативно вплинути на перспективи розвитку металургійного виробництва. Таке становище потребує значних інвестицій у розвиток наукових досліджень та створення нових технологій зменшення вуглецевого сліду під час виробництва металопродукції. Аналіз показує, що за рахунок використання наукового потенціалу та з використанням відомих у світовій практиці технологій в Україні є принципова можливість зменшити енергоспоживання на виробництво металопродукції, поліпшити екологічну ситуацію, зменшити викиди парникових газів. Тому сьогодні надзвичайно*

© Тубольцев Л.Г., Петренко В.О., Селегей А.М., 2023

актуальним є питання науково-технічного забезпечення інноваційного розвитку ГМК України. Першочергові науково-технічні завдання у цьому напрямку полягають у зменшенні витрат енергоресурсів на виробництво металопродукції та досягнення найкращих світових показників. Показано головні стратегічні цілі та пріоритети розвитку ГМК на сучасному етапі.

Ключові слова: чорна металургія України, промислова політика, сталий розвиток, параметри, науково-технічні рішення, сортамент, екологія, наукові дослідження.

Постановка задачі

Аналіз стану чорної металургії України свідчить, що, окрім руйнування металургійних підприємств внаслідок військової агресії РФ, нестабільна робота металургійної галузі пов'язана з декількома причинами:

- втратою держави впливу на технічну та промислову політику в металургійній галузі;
- недостатньо розвиненим внутрішнім ринком металопродукції
- погіршенням технічного та технологічного стану чорної металургії, що призвело до збільшення витрат енергоресурсів та скорочення сортаменту продукції до сировинного рівня;
- недостатнє науково-технічне супроводження металургійного виробництва;
- значним скороченням металургійного наукового потенціалу та недостатнім впровадженням у виробництво сучасних та перспективних наукових розробок.

У найближчий на вітчизняну металургійну галузь може очікувати ряд викликів, пов'язаних з необхідністю повоєнного відновлення зруйнованих військами РФ підприємств, необхідністю докорінної зміни технічного та технологічного рівня виробництва, а також необхідністю протистояти екологічним викликам та обмеженням світового ринку металопродукції.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

За останні 30 років в науковій літературі багато уваги приділялось визначенню оптимальних шляхів розвитку чорної металургії України [1,2].

Можливо виділити дві крайні точки зору – від повної приватизації металургійних підприємств до повного контролю держави над металургійною галуззю. Фактично перемогла доктрина повної приватизації, але очікуваних результатів сталого розвитку металургії так і було досягнуто. Проблема сталого розвитку металургії гостро стала після військової агресії РФ у 2022 році. Ситуація в галузі різко змінилася [3]. Станом на кінець 2022 року в Україні 52 % виробничих потужностей металургійних підприємств знаходилися в зоні окупації РФ і фактично зруйновані. Це підприємства Донбасу та Маріуполя. Решта металургійних підприємств України, хоча і можуть виробляти необхідний Україні сортамент металопродукції, частково або повністю припинили свою роботу. Безперервні ракетні обстріли з боку РФ змусили підприємства перейти на воєнний стан. Так, МК «АрселорМіттал Кривий Ріг» працює на 40 %, на 80 % працює Кам'янський МК, практично зупинений МК «Запоріжсталь». Загальні втрати чорної металургії України становлять більше 2/3. Падіння виробництва сталі у 2022 році в чорній металургії України становило більше на 70 % [4].

Мета дослідження

Метою даної роботи є дослідження перспективних напрямів сталого розвитку чорної металургії України в сучасних умовах.

Виклад основного матеріалу

Розглянемо чинники, що впливають на сталий розвиток чорної металургії України більш детально.

Вплив держави на розвиток металургійної галузі.

Історія свідчить, що альтернативи прогнозуванню і плануванню людство ще не знайшло. Відмова від стратегії поведінки призводить до хаосу. Відсутність планування, низький науково-технічний та управлінський рівень металургійного виробництва в умовах відкритості української економіки не дозволили українським підприємствам достойно конкурувати з розвиненими країнами та міжнародними компаніями. Це підтвердило тезу, що впевнене існування та розвиток в умовах ринку можливе лише після освоєння

підприємствами сучасних технологій та методів управління, які характерні для розвинених країн.

Розглянемо історію цього питання в Україні.

Чорна металургія належить до інерційних галузей виробництва і її розвиток практично неможливий без прийняття довгострокових програм. Щоб показати реальний вплив держави на розвиток ГМК України, заглибимося у недалеке минуле. Після набуття Україною незалежності стався відхід держави від планового управління та перехід на ринкові відносини. Цей період тривав з 1990 по 1995 роки і характеризувався стрімким падінням виробництва продукції ГМК (рис. 1). У цей період психологічно, економічно, технічно і функціонально чорна металургія не була готова ще повною мірою працювати в умовах ринкових відносин, жорсткої конкуренції зі світовими виробниками металів [5].

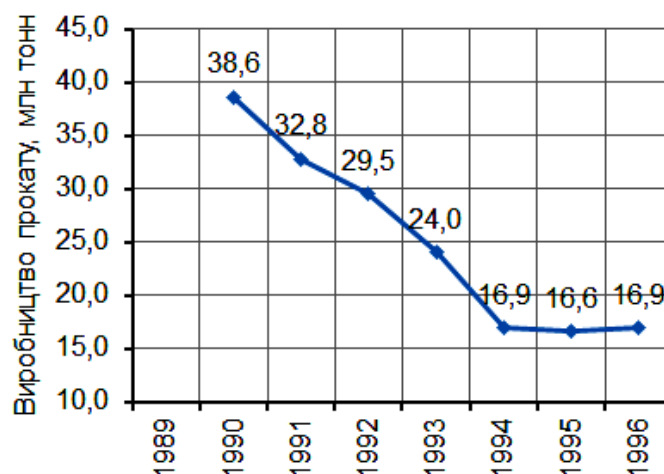


Рисунок 1 – Динаміка виробництва прокату підприємствами МК України у 1990-1996 роках

Активне втручання держави у розвиток чорної металургії України у 1995-2011 роки шляхом прийняття ряду законодавчих актів, Концепції та «Державної програми розвитку та реформування гірничо-металургійного комплексу на період до 2011 року» призвело розвитку наукових досліджень, стабілізації ситуацію в галузі та збільшенню виробництва прокату (рис. 2) [6].

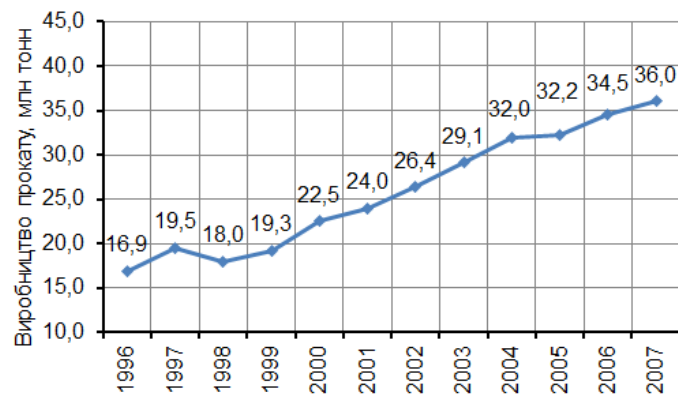


Рисунок 2 – Виробництво прокату підприємствами МК України у 1996-2007 роках, млн тонн

Але зміна зовнішніх умов та світові фінансові кризи не дозволили закріпити позитивну тенденцію (рис. 3). З 2011 року держава повністю втратила вплив на ситуацію в металургійній галузі, що призвело до стрімкого падіння виробництва, яке не припинилося і досі. У цей же період відбулася повна приватизація підприємств чорної металургії України, які майже повністю припинили співпрацю з вітчизняними науковими організаціями через перехід на виробництво традиційної металопродукції сировинної спрямованості.

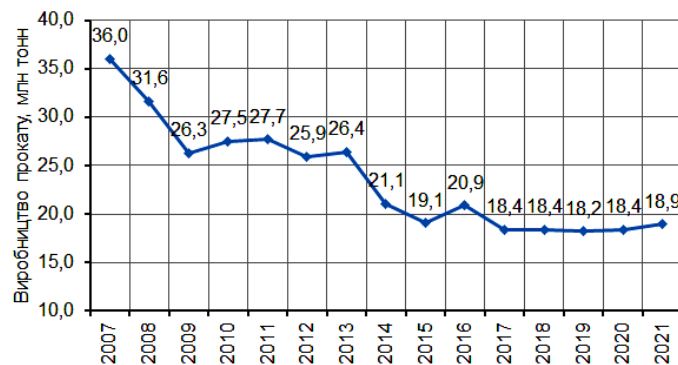


Рисунок 3 – Виробництво прокату підприємствами МК України у 2007-2021 роках, млн тонн

Наведені дані свідчать, що в інтересах розвитку економіки України важливо поєднати інтереси державного управління та управління на рівні конкретних підприємств, забезпечити оперативне реагування на макропроцеси економічного та виробничого характеру. Це завжди були

функції науково-дослідних організацій, проте сьогодні цими питаннями ніхто серйозно не займається. Основу державного впливу на розвиток металургійного виробництва мають становити:

- розвиток наукових досліджень та науково-технічне супроводження сучасних технологій металургійного виробництва;

- аналіз тенденцій, рівня розвитку металургійних технологій та обладнання;

- прогнози металоспоживання, моніторинг та поточний аналіз економічної та виробничої діяльності підприємств;

- оцінка впливу нових законодавчих та нормативних актів на господарську діяльність підприємств, виходячи з перспективних показників розвитку промислових секторів вітчизняної економіки.

Головним завданням сьогодні є визначення та реалізація стратегії розвитку науково-технічного потенціалу, здатного забезпечити майбутнє металургії на основі створення перспективних технологічних процесів.

При розгляді перспективного розвитку металургії виникає маса питань, на які поки немає однозначної відповіді. На сьогодні вся чорна металургія України приватизована, але з року в рік втрачає свої позиції в світі і вже вийшла з першої десятки країн-найбільших виробників сталі. Наведений вище короткий аналіз показує, що в національній державній політиці не враховуються головні показники розвитку країни – цільова установка, визначення та затвердження критеріїв і параметрів розвитку країни, гласність і контроль їх виконання. Особливої уваги держави потребує металургійна галузь в умовах післявоєнного відновлення для ліквідації наслідків військової агресії РФ проти України у 2014-2023 років. Указ Президента Таке становище потребує зміни ставлення до ролі наукових досліджень у металургійній галузі.

Проблеми удосконалення сортаменту металургійної продукції

Сталь як високотехнологічний конструкційний матеріал ще не вичерпала своїх можливостей щодо деформуємості, міцності, корозійній стійкості та іншим показникам якості. Тому в світі швидко розвиваються такі галузі промисловості, які вкладають набагато більше коштів в наукові дослідження і дослідно-конструкторські розробки. Металургам слід задуматися над тим,

чому тільки малими кроками вдається відкривати ринки для нових областей застосування сталі.

Розвиток гірничо-металургійного комплексу України до 1989-1990 років було засновано на припущенні, що потреби у металах перевищують виробничі потужності та наявні ресурси. Тому у гірничо-металургійному комплексі йшло інтенсивне нарощування гірничо-добувних та металургійних потужностей, ставилися завдання максимально можливого випуску металопродукції. Внаслідок падіння системи централізованого адміністративного управління та кризи економіки потреби споживачів України у металопродукції суттєво знизилися. Тому основною проблемою розвитку гірничо-металургійного комплексу у 1990-2000 роках, та донині, є проблема – як управляти використанням сировинних, енергетичних ресурсів при обмеженому фінансуванні для максимального задоволення потреб країни у металопродукції.

При наявності власної залізорудної бази [7], родовищ вугілля та необхідних водних ресурсів Україна має всі можливості для сталого розвитку металургійної галузі. Розвитку чорної металургії сприяє також компактне розташування підприємств, які забезпечені транспортними системами і морськими портами. Однак протягом 1990–1995 років споживання прокату в Україні інтенсивно скорочувалося. Обсяг внутрішнього ринку металопродукції за останні 20 років становив ~ 4,5-10 млн т на рік (рис. 4). У перші роки незалежності Україна виплавляла близько 50 млн т сталі, при внутрішньому її споживанні понад 25 млн т металопродукату. В 2017 році внутрішнє споживання прокату було на рівні 5,2 млн т, з яких 3,9 млн т українського виробництва.

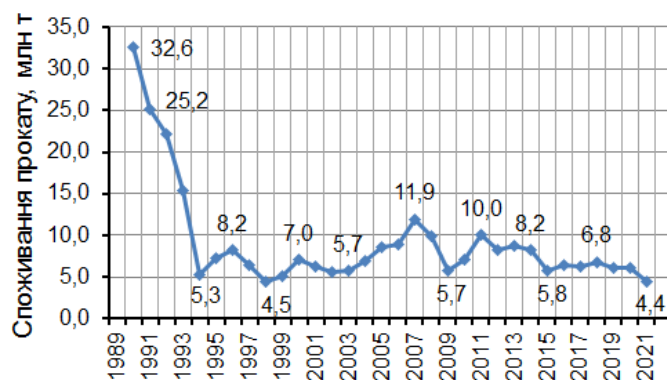


Рисунок 4 – Внутрішнє споживання прокату в Україна у 1990-2021 роках, млн тонн

Таким чином, проблема внутрішнього ринку металопродукції продовжує загострюватися. Водночас, можна зазначити, що при сприятливих умовах розвитку економіки України внутрішній ринок металопродукату може збільшитися до 12-15 млн тонн. Для розвитку інфраструктури на найближчі 10 років Україні потрібно близько 300 млн т металопродукату, що може повністю завантажити металургійну галузь країни. [8]. Сортамент металопродукції чорної металургії України є досить широкий (рис. 5), але в останні роки орієнтація на експорт сировинних видів продукції та напівфабрикатів призвела до його суттєвого скорочення. При цьому в останні роки зростає імпорту металопродукату, причому половину імпорту складала продукція, що виробляється на українських підприємствах.

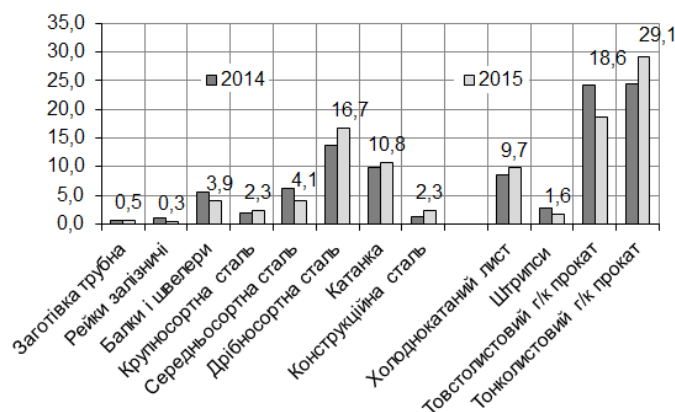


Рисунок 5 – Сортамент прокату ГМК у 2014-2015 роках, %.

Обсяги виробництва прокату в Україні вже багато років знижуються за рахунок скорочення ефективних його видів. У сортаменті прокату ГМК переважають напівфабрикати та продукція первинних переділів без додаткової вартості, на які ще існує попит на світовому ринку, але які не мають перспектив. Суттєво зменшилась кількість видів прокату з високою доданою вартістю (рейки, балки, середній сорт, лист та жерсть з покриттям). При цьому збільшилась частина видів прокату, що мали попит на світовому ринку, зокрема заготівка (рис. 6). З одного боку це свідчило про впровадження у ГМК ринкових відносин, з іншого – про стрімке падіння економіки України та проблеми металоспоживаючих галузей.

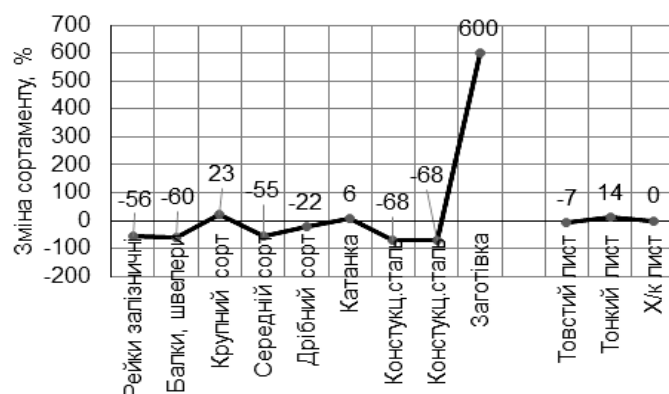


Рисунок 6 – Зміна частки видів прокату ГМК у 2018 році до 1989 року

У 2022 році внаслідок військової агресії РФ в Україні відбулися значні втрати по сортаменту металопродукції, що потребує визначення можливості його компенсації. Листовий сортамент комбінату «ММК ім. Ілліча» може бути лише частково замінено на комбінаті «Запоріжсталь», а виробництво оцинкованого прокату на ТОВ «Юністіл» (м. Кривий Ріг), що входить до структури Metinvest. Основні збитки зазнала галузь від втрати сортаменту продукції МК «Азовсталь». В першу чергу це стосується продукції рейкобалкового стану 800/650 та товстолистого прокату, що вироблявся на станах 3000 та 3600. МК «Азовсталь» був єдиним виробником рейок та постачальником продукції для залізничного транспорту (несучі рами вагонів, профілі Z₃₁₀, тощо). Оцінку заміни сортаменту рейкобалкового стану 800/650 МК «Азовсталь» необхідно виконати для умов ПрАТ «Камет-сталь» та Дніпровського металургійного заводу. Виробництво помольних куль для гірничо-збагачувальних комбінатів може бути замінено на кулепрокатному стані ПрАТ «Камет-сталь». Таке становище свідчить про те, що питанням національної безпеки України необхідно приділити особливу увагу, у тому числі за рахунок створення Концепції та Державної програми відновлення роботи ГМК [9].

Науковий розвиток металургійних технологій.

Перше визнання українська металургійна наука отримала у 30-ті роки ХХ століття. Після 1936 року темпи розвитку чорної металургії України знизилися. Тому створення власного металургійного наукового потенціалу було обґрунтовано необхідністю корінного удосконалення технологій

виробництва металопродукції. Про те, що науково-технічний супровід металургійної галузі є одним з основних чинників управління виробництвом свідчить наступний факт: вже у 1940 році темпи зростання виробництва сталі в Україні збільшилися на 27 %. У цьому є чимала заслуга і співробітників Інституту чорної металургії (ІЧМ) та Дніпропетровського металургійного інституту (ДМетІ), творчий потенціал яких було реалізовано у виробництві в короткий термін.

Завдяки використанню результатів наукових досліджень, за останні 50 років у світовій практиці витрати енергії на виробництво 1 т чавуну знизилися наполовину. Зниження енерговитрат в доменному виробництві відбулося за рахунок зміни умов плавки і підвищення якості шихти, шляхом збільшення вмісту заліза в ній. Зменшенню енерговитрат сприяють також створення доменних печей великого об'єму; інтенсифікація технології доменної плавки; використання кисню; вдосконалення режимів завантаження печей та інші заходи. За період 1999-2007 років на підприємствах гірничо-металургійного комплексу України знижено питомі витрати енергоресурсів з 2,04 до 1,07 (- 0,86) т.у.п. на тонну прокату за рахунок технічного переозброєння доменного виробництва, збільшення частки конвертерної сталі, зменшення витрат на організаційні заходи. Подальше зниження енерговитрат вимагатиме суттєвих капітальних вкладень на технічне переозброєння та на науково-технічні розробки. Проте у наступні роки в Україні відбулося погіршення показників питомих витрат на виробництво прокату через світові фінансові кризи, втрату державою впливу на роботу металургійних підприємств, через практичної відмови підприємств від науково-технічного супроводження металургійного виробництва. За експертною оцінкою питомі витрати енергоносіїв складають біля 1,34-1,45 кг у.п./т прокату.

Екологічні проблеми чорної металургії

Чорна металургія сьогодні базується на фізико-хімічних процесах, що мають тисячолітню історію. Розвиток сучасної металургії починається у XVIII столітті. Основу цих процесів складають хімічні реакції відновлення оксидів заліза вуглецем, до добувається переважно з викопних джерел. У той же час застосування вуглецевих технологій призводить до ризику глобальних

екологічних проблем внаслідок неконтрольованих викидів парникових газів. І хоча частка металургії у викидах парникових газів у світі складає біля 7 %, екологічні вимоги суспільства потребують застосування технологій з обмеженим використанням вуглецю як відновника та енергоносія. Дані екологічних спостережень підтверджують необхідність застосування нових технологій виплавляння сталі [10].

У світі спостерігається істотна активізація промислової діяльності людини і посилення негативного впливу на атмосферу Землі. За останні 10 років викиди вуглекислого газу (CO_2) в атмосферу планети збільшилися на 2 %, що призвело до підвищення середньорічної температури поверхні Землі і загрожує непередбачуваними наслідками. До 2000 років значного впливу рівня виробництва сталі у світі на підвищення температури не спостерігалось. Після збільшенні світового виробництва сталі понад 800 млн тонн/рік спостерігається суттєве підвищення середньорічної температури поверхні Землі. За останні 20 років спостерігається кореляція між обсягами виробництва світового сталі та підвищенням температури Землі (рис. 7).

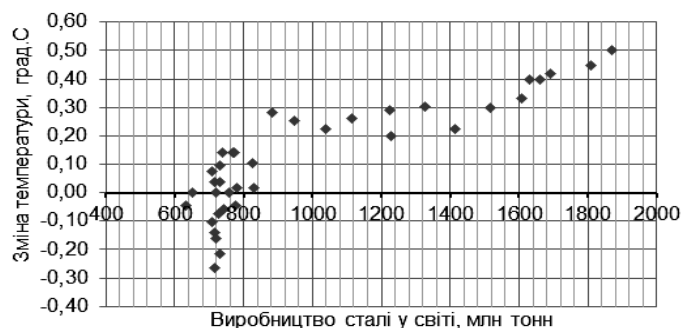


Рисунок 7 – Зміни середньорічної температури поверхні Землі та обсяги виробництва сталі у світі (1970-2021 рр.)

Безумовно, на цей показник впливає загальний розвиток промисловості та інфраструктури, але і на металургію покладається суттєва відповідальність. Посилення політики державного впливу на екологічні проблеми, зокрема в ЄС, означає, що і підприємства можуть зазнати непередбачуваного ризику відповідальності за забруднення навколишнього середовища. Вирішення цієї проблеми полягає не тільки у впровадженні на підприємствах екологічних

заходів, а передусім у запровадженні енергозощадливих технологій, що неможливо зробити без сучасних наукових розробок на відповідного науково-технічного супроводження. Проте існує думка, що навіть радикальне скорочення викидів не зможе запобігти підвищенню середньорічної температури Землі. Людству доведеться інвестувати в варіанти геоінженерії, зокрема у видалення вуглекислого газу з атмосфери, що неможливо зробити без інвестування у розвиток наукових досліджень як у загальних дисциплінах, так і у металургійній галузі. [11]

Проблеми наукового забезпечення розвитку металургійних технологій

Одним з важливих напрямків сучасних наукових досліджень є орієнтація на мінімізацію споживання енергоресурсів під час виробництва металопродукції. Такий напрямок дозволяє одночасно вирішити і екологічні проблеми. В Україні перспективи енергозбереження пов'язані з вирішенням таких задач: оновлення основних фондів, впровадження нових енергозберігаючих і безвідходних технологій, обладнання та апаратів; заміна природного газу альтернативними видами палива (вугілля, ПВП, продукти газифікації вугілля і мазуту); розширення використання вторинних енергетичних ресурсів (теплові ресурси, утилізація конденсату промислового пару); зменшення втрат матеріальних і паливо-енергетичних ресурсів на всіх стадіях технологічного циклу.

Аналіз показує, що за рахунок використання наукового потенціалу та з використанням відомих у світовій практиці технологій в Україні є принципова можливість зменшити енергоспоживання на виробництво металопродукції, поліпшити екологічну ситуацію, зменшити викиди парникових газів (CO₂). В останні роки все більшої уваги від науковців потребує розроблення технологій щодо зменшення вуглецевого сліду під час виплавляння сталі. У світі все більше посилюється тенденція зростання витрат на новації та розробку процесів одержання нової продукції з мінімальним вуглецевим слідом. На теперішній час у світі розробляються принципово нові технології виробництва залізорудної сировини та металу з використанням водню [12]. Така технологія дозволяє відмовитися від застосування вуглецевмісних видів палива (вугілля, кокс, природний газ). Однак використання водню в якості палива для

металургійних агрегатів, поки обходиться дорожче, ніж вуглецевомісні його види. Реального зниження емісії CO₂ можна досягти тільки за рахунок дешевої енергії з відновлюваних джерел для виробництва водню. Тому орієнтація на проекти водневої металургії стає довгостроковим трендом.

Порівняння найбільш відомих технологій виробництва сталі щодо кількості викидів парникових газів наведено на (рис. 8).

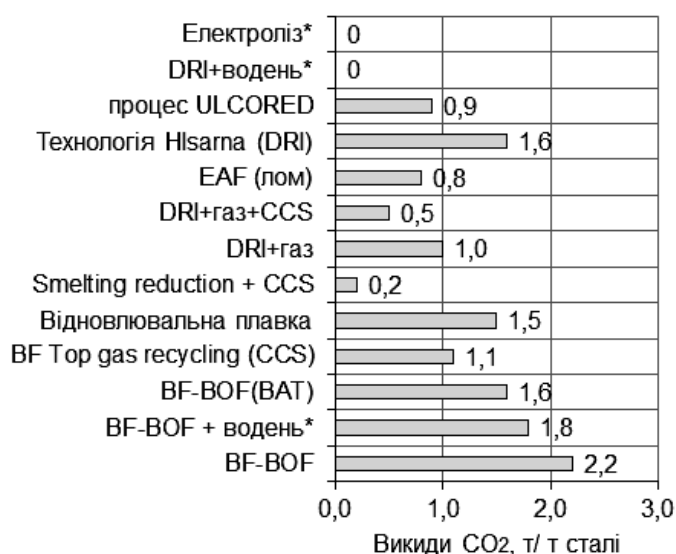


Рисунок 8 – Кількість викидів CO₂ для діючих та перспективних виробництв сталі, т CO₂/т сталі

Наведемо розшифровку зазначених технологій.

BF-BOF – технологія виробництва сталі за схемою «доменна піч – кисневий конвертер» (BF-BOF process).

BF-BOF + водень – технологія виробництва сталі за схемою «доменна піч – кисневий конвертер» з використанням відновлювальних та енергетичних можливостей водню.

BF-BOF(BAT) – виробництво сталі за схемою «доменна піч – кисневий конвертер», що використовує найкращі сучасні технології одержання чавуну та сталі.

BF Top gas recycling (CCS) – технологія доменної плавки з використанням систем уловлювання, зберігання та використання доменного газу (CCS).

Smelting reduction + CCS – технологія відновлювальної плавки, якою передбачено уловлювання, зберігання та використання газів, що відходить від технологічних агрегатів.

EAF (лом) – процес виробництва сталі в електропечах з використанням металевих брухту.

DRI+водень – технологія відновлення заліза з використанням водню теоретично дозволяє усунути викиди CO₂ та зменшити вуглецевий слід

Електроліз – дещо екзотичний для масової металургії процес досягнення вуглецевої нейтральності.

З наведених даних видно, що перспективи зменшення викидів парникових газів пов'язані з удосконаленням технологічних процесів, з використанням водню як відновника та енергоносія, з процесами збору та утилізації CO₂. Такий напрямок тісно пов'язаний з розвитком наукових досліджень та їх впровадження у виробництво, для чого необхідно вирішити багато науково-технічних та організаційних проблем. На теперішній час у світі активно розробляються принципово нові технології виробництва залізорудної сировини та металу з використанням водню [13]. Така технологія дозволяє відмовитися від застосування вуглецевмісних видів палива (вугілля, кокс, природний газ). Однак використання водню в якості палива для металургійних агрегатів, поки обходиться дорожче, ніж вуглецевмісні його види. Реального зниження емісії CO₂ можна досягти тільки за рахунок дешевої енергії з відновлюваних джерел для виробництва водню. Тому орієнтація на проекти водневої металургії стає довгостроковим трендом, що потребує активної участі держави у цьому процесі.

Основні напрямки науково-технічних рішень для сталого розвитку металургійного виробництва

Структура сучасної світової металургії ґрунтується на досягненнях металургійної науки. Тому сьогодні надзвичайно актуальним є питання науково-технічного забезпечення інноваційного розвитку ГМК України. Першочергові науково-технічні завдання у цьому напрямку полягають у зменшенні витрат енергоресурсів на виробництво металопродукції та досягнення найкращих світових показників. Нині в Україні середні питомі

енерговитрати перевищують середньосвітові показники – у виробництві чавуну на 14 %), сталі – на 30 %), прокату – на 50-60 %. [14]. Таке становище вимагає проведення корінної модернізації та забезпечення нового технологічного рівня виробництва, істотного збільшення обсягу капітальних вкладень та удосконалення інвестиційної політики.

Тому на сучасному етапі головними стратегічними цілями та пріоритетами розвитку ГМК повинні стати:

- структурна перебудова та модернізація галузі;
- зниження в експорті частки сировини та напівфабрикатів, збільшення обсягів виробництва продукції підвищеного ступеня готовності та високої якості;
- розробка та впровадження інноваційних проєктів розвитку металургійних переділів на основі ресурсо- та енергозберігаючих екологічно чистих технологій з використанням кращих вітчизняних та світових розробок;
- удосконалення систем управління технологічними процесами і якістю продукції з метою підвищення конкурентоздатності продукції на світовому ринку;
- освоєння нових конструкційних і функціональних матеріалів, що відповідають міжнародним стандартам;
- концентрація зусиль держави на проведенні ефективної науково-технічної політики у металургійному комплексі.

Чорна металургія України завжди розвивалася на основі нових наукових знань, результатів наукових досліджень вітчизняних НДІ та використання передового досвіду підприємств, завдяки яким вдосконалювалася світова та вітчизняна чорна металургія. Позначимо деякі найважливіші напрями перспективних наукових досліджень, які можуть дозволити на найближчу перспективу досягти стратегічних цілей розвитку металургії та вивести її на новий технічний рівень:

- розвиток вітчизняної мінерально-сировинної бази, розробка нових видів металургійної сировини та технологій її підготовки, зокрема, шляхом підвищення глибини збагачення та збільшення вмісту заліза;

- розробка та впровадження нових видів шихтових матеріалів та енергоносіїв для доменного виробництва;

- розробка та промислове випробування наукомістких систем автоматизованого контролю доменних печей;

- розробка та промислова реалізація ефективних процесів сталеплавильного виробництва, зокрема, технології конвертерної плавки, нових методів позапічної обробки чавуну та сталі для отримання високоякісної продукції;

- розробка, дослідження та вдосконалення способів безперервного виробництва та розливання сталі, у т.ч. технології та обладнання МБЛЗ нового покоління;

- створення безперервних процесів «розливання-прокатка» з удосконаленням технології та обладнання безперервної прокатки;

- розвиток процесів прокатного виробництва з метою зниження витрат матеріальних та енергетичних ресурсів, отримання заданої структури та властивостей прокату;

- розробка економнолегованих марок сталі та розвиток наукових основ технологій їх термічної обробки;

- розроблення нових способів безкоксового отримання первинного металу, технології та обладнання для відновлення оксидів і прямого отримання заліза;

- розроблення нових технологій забезпечення відповідного екологічного стану навколишнього середовища, зокрема, створення нових процесів та пристроїв уловлювання пилу.

Реалізація запропонованих заходів дає змогу зміцнити науково-технічний потенціал України, прискорити впровадження результатів наукових досліджень у металургійну та гірничорудну промисловість, підвищити конкурентоспроможність металургійної продукції на внутрішньому та світовому ринках, зменшити залежність країни від коливань світової економіки.

Висновки

Розглянуто основні напрямки стабілізації роботи чорної металургії України. Показано, що одними з головних параметрів, що визначають сталий розвиток галузі на сучасному етапі є: вплив держави на розвиток металургійної галузі, проблеми удосконалення сортаменту металургійної продукції, науковий розвиток металургійних технологій, екологічні проблеми, проблеми наукового забезпечення виробництва, основні напрямки науково-технічних рішень розвитку металургійних технологій.

Показано, що нині в національній державній політиці не враховуються головні показники розвитку України – цільові установки, визначення та затвердження критеріїв і параметрів розвитку країни, гласність і контроль їх виконання. Таке становище потребує розроблення промислової політики у металургійній галузі.

Аналіз показує, що в країні продовжує загострюватися проблема внутрішнього ринку металопродукції., скорочується сортамент ефективних видів металопродукції, країна все більше орієнтується на експорт сировинних видів металопродукції та напівфабрикатів.

Відзначено, що науково-технічний супровід металургійної галузі має одним з основних чинників розвитку та ефективності виробництва. Використання результатів наукових досліджень є одним з головних чинників зменшення витрат енергоресурсів на виробництво металопродукції.

Відзначено, що екологічні проблеми можуть вкрай негативно вплинути на перспективи розвитку металургійного виробництва. Таке становище потребує значних інвестицій у розвиток наукових досліджень та створення нових технологій зменшення вуглецевого сліду під час виробництва металопродукції.

Аналіз показує, що за рахунок використання наукового потенціалу та з використанням відомих у світовій практиці технологій в Україні є принципова можливість зменшити енергоспоживання на виробництво металопродукції, поліпшити екологічну ситуацію, зменшити викиди парникових газів. Тому сьогодні надзвичайно актуальним є питання науково-технічного забезпечення інноваційного розвитку ГМК України. Першочергові науково-технічні завдання у цьому напрямку полягають у зменшенні витрат енергоресурсів на виробництво металопродукції та досягнення найкращих світових показників.

Показано головні стратегічні цілі та пріоритети розвитку ГМК на сучасному етапі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Захарченко В. Пріоритети національного промислового комплексу. Вісник НАН України. 2004. №7. С. 25-38.
2. Курза Ю. П. Стратегія структурних реформ в економіці та новаційного розвитку України. Наука та інновації. 2014. Т. 10. № 3. С. 80-97.
3. Перші підсумки діяльності металургів України у 2022 році. [Електронний ресурс]: www.gmk.center. <https://dia.dp.gov.ua/pershi-pidsumki-diyalnosti-metallurgiv-ukra%D1%97ni-u-2022-roci/>.
4. Производство стали в Украине может достичь 7,6 млн т в 2022 году. [Електронний ресурс]: <https://gmcenter.com/news/proizvodstvo-stali-v-ukraine-mozhet-dostignut-7-6-mln-t-v-2022-godu/>.
5. Грищенко С. Г., Власюк В. С. Состояние мировой металлургии в новых реалиях экономического кризиса (по материалам 67 сессии Комитета по стали Организации экономического сотрудничества и развития, Париж, 10-11 декабря 2009 года). Металлургическая и горнорудная промышленность. 2010. №1. С. 4-5.
6. Державна програма розвитку та реформування гірничо-металургійного комплексу України до 2011 р. (Затверджена Постановою Кабінету Міністрів України від 28.07.2004 № 967).
7. Почему страны с богатыми природными ресурсами не развиваются. [Електронний ресурс]: http://emchezgia.ru/syrye/6.1_mestorozhdeniya_zheleznyh_rud_v_mire.php.
8. Власюк В. Современная роль и перспективы Украины на глобальном рынке стали. [Електронний ресурс]: <https://zn.ua/author/vladimir-vlasyuk>
9. Тубольцев Л. Г. Бабаченко О.І., Меркулов О.Є. Концепція сталого розвитку чорної металургії України в сучасних умовах. Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. Вип 36. 2022. С.4-21.
10. Галушіна Т. Міжнародний екологічний форум «Зелена економіка. Зелені технології. Зелені інвестиції». [Електронний ресурс]: <http://ua-ekonomist.com/5-mizhnarodnyj-ekologichnyj-forum-zelena-ekonomika-zeleni-tehnologii-zeleni-investicii.html>.
11. Світ ризикує зануритися в кліматичну “петлю загибелі”, попереджають аналітики. <https://internetua.com/svit-rizikuye-zanuritisya-v-klimaticsnu-petlua-zagibeli-poperedjauat-analitiki>
12. Минэнерго разработало три документа для подготовки Водородной стратегии Украины. Uaprom.info : [Електронний ресурс]: <http://uaprom.info/news/179101-minenergo-razrabotalo-tri-dokumenta-podgotovki-vodorodnoj-strategii-ukrainy.html>.
13. Механізм регулювання вуглецевих кордонів. European Commission : [Електронний ресурс]: https://ec.europa.eu/taxation_customs/green-taxation-0/carbon-border-adjustment-mechanism_en].
14. Грищенко С. Г., Гринев А. Ф., Тубольцев Л. Г. Проблемные вопросы развития горно-металлургического комплекса Украины. Металлургическая и горнорудная промышленность. 2017. №1. С. 2-6.

REFERENCES

1. Zakharchenko V. Priorities of the national industrial complex. Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine. 2004. No. 7. pp. 25-38.
2. Kurza Yu. P. Strategy of structural reforms in the economy and innovation development of Ukraine. Science and innovation. 2014. V. 10. No. 3. S. 80-97.
3. The first subbags of activity of metallurgy in Ukraine in 2022. [Electronic resource]: www.gmk.center. <https://dia.dp.gov.ua/pershi-pidsumki-diyalnosti-metallurgiv-ukra%D1%97ni-u-2022-roci/>.

4. Steel production in Ukraine may reach 7.6 million tons in 2022. [Electronic resource]: <https://gmk.center/news/proizvodstvo-stali-v-ukraine-mozhet-dostignut-7-6-mln-t-v-2022-godu/>.
5. Grishchenko S. G., Vlasjuk V. S. The state of the world metallurgy in the new realities of the economic crisis (based on the materials of the 67th session of the Committee on Steel of the Organization for Economic Cooperation and Development, Paris, December 10-11, 2009). Metallurgical and mining industry. 2010. №1. pp. 4-5.
6. State program for the development and reform of the gas-fired and metallurgical complex of Ukraine until 2011. (Approved by the Decree of the Cabinet of Ministers of Ukraine in 28.07.2004 No. 967).
7. Why countries with rich natural resources do not develop. [Electronic resource]: http://emchezgia.ru/syrye/6.1_mestorozhdeniya_zheleznyh_rud_v_mire.php.
8. Vlasjuk V. Modern role and prospects of Ukraine in the global steel market. [Electronic resource]: <https://zn.ua/author/vladimir-vlasjuk>
9. Tuboltsev L. G. Babachenko O.I., Merkulov O.Є. The concept of steel development of black metallurgy in Ukraine in today's minds. Fundamental and applied problems of black metallurgy. Vip 36. 2022. P.4-21.
10. Galushina T. International environmental forum “Green economy. Green technologies. Green investments”. [Electronic resource]: <http://ua-ekonomist.com/5-mizhnarodnyj-ekologichnyj-forum-zelena-ekonomika-zeleni-tehnologii-zeleni-investycji.html>.
11. The world is risking getting into the climate “loop of death,” analysts say. <https://internetua.com/svit-rizikuye-zanuritisya-v-klimaticsnu-petlua-zagibeli-poperedjauat-analitiki>
12. The Ministry of Energy has developed three documents for the preparation of the Hydrogen Strategy of Ukraine. Uaprom.info: [Electronic resource]: <http://uaprom.info/news/179101-minenergo-razrabotalo-tri-dokumenta-podgotovki-vodorodnoj-strategii-ukrainy.html>.
13. Mechanism of regulation of coal cordons. European Commission: [Electronic resource]: https://ec.europa.eu/taxation_customs/green-taxation-0/carbon-border-adjustment-mechanism_en.
14. Grishchenko S. G., Grinev A. F., Tuboltsev L. G. Problematic issues of development of the mining and metallurgical complex of Ukraine. Metallurgical and mining industry. 2017. No. 1. pp. 2-6.

Received 02.01.2023.

Accepted 08.02.2023.

UDC 669.1.061.6

L. Tuboltsev, V. Petrenko, A. Selegej

PROBLEMS OF SCIENTIFIC AND TECHNICAL DEVELOPMENT OF METALLURGICAL PRODUCTION

The purpose of this work is to study promising areas of sustainable development of ferrous metallurgy of Ukraine in modern conditions. The main areas of stabilization of the industry were considered, including: the influence of the state on the development of the metallurgical industry, problems of improving the range of metallurgical products, scientific development of metallurgical technologies, environmental problems of ferrous metallurgy, problems of scientific support for the development of metallurgical technologies, the main

directions of scientific and technical solutions for the sustainable development of metallurgical production. It is shown that currently the main indicators of the country's development are not taken into account in the national state policy - target settings, definition and approval of criteria and parameters of the country's development, publicity and control of their implementation. Such a situation requires the development of an industrial policy in the metallurgical industry. The analysis shows that the problem of the internal market of metal products continues to worsen in the country, the assortment of effective types of metal products is decreasing, the country is increasingly oriented towards the export of raw types of metal products and semi-finished products. It was noted that the scientific and technical support of the metallurgical industry is one of the main factors in the development and efficiency of production. The use of the results of scientific research is one of the main factors in reducing the cost of energy resources for the production of metal products. It was noted that environmental problems can have an extremely negative impact on the prospects for the development of metallurgical production. This situation requires significant investments in the development of scientific research and the creation of new technologies for reducing the carbon footprint during the production of metal products. The analysis shows that due to the use of scientific potential and the use of technologies known in world practice in Ukraine, there is a fundamental opportunity to reduce energy consumption for the production of metal products, improve the environmental situation, and reduce greenhouse gas emissions. Therefore, the issue of scientific and technical support for the innovative development of MMC of Ukraine is extremely relevant today. The primary scientific and technical tasks in this direction are to reduce the consumption of energy resources for the production of metal products and achieve the best global indicators. The main strategic goals and priorities of MMC development at the current stage are shown.

Keywords: ferrous metallurgy of Ukraine, industrial policy, sustainable development, parameters, scientific and technical solutions, assortment, ecology, scientific research.

Тубольцев Леонід Григорович, кандидат техн. наук, старший науковий співробітник, Заслужений працівник промисловості України, завідувач Науково-організаційного відділу, Інститут чорної металургії імені З. І. Некрасова НАН України, пл. Академіка Стародубова, 1, м. Дніпро, Україна, 49107; e-mail: isi.tubol@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-9540-3037>

Петренко Віталій Олександрович, д-р техн. наук, професор, Заслужений діяч науки і техніки України, в.о. завідувача кафедри інтелектуальної власності та управління проектами, Український державний університет науки і технологій, проспект Гагаріна, 4, м. Дніпро, 49600; e-mail: petrenko_v@email.ua; <https://orcid.org/0000-0001-5017-1674>

Селегей Андрій Миколайович, д-р техн. наук, доцент, професор, Український державний університет науки і технологій, проспект Гагаріна, 4, м Дніпро, 49600; e-mail: selegey@ua.fm; <https://orcid.org/0000-0003-3161-5270>

Tuboltsev Leonid, Candidate of Technology. Sciences, senior researcher, Honored Worker of the Industry of Ukraine, head of the Scientific and Organizational Department, Iron and Steel Institute named after Z. I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, sq. Akademika Starodubova, 1, Dnipro, Ukraine, 49107; e-mail: isi.tubol@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-9540-3037>

Petrenko Vitalii, Dr. Tech. of Sciences, professor, Honored Worker of Science and Technology of Ukraine, acting Head of the Department of Intellectual Property and Project Management, Ukrainian State University of Science and Technology, 4 Gagarina Avenue, Dnipro, 49600; e-mail: petrenko_v@email.ua; <https://orcid.org/0000-0001-5017-1674>

Selegej Andriy, Dr. Tech. of Sciences, professor, Ukrainian State University of Science and Technology, 4 Gagarina Avenue, Dnipro, 49600; e-mail: selegey@ua.fm; <https://orcid.org/0000-0003-3161-5270>

ЗМІСТ / CONTENTS

Бояркін В.В., Ремез О.А., Польща О.С.

Математичне моделювання профілювання труб
квадратного поперечного перерізу

Boiarkin V., Remez O., Polshcha O.

Mathematical modeling of the forming of square cross section hollow profiles3

Гадзюра М.П., Давидчук Н.К., Тимошенко Я.Г., Пінчук М.О.

Дослідження впливу модифікування вуглевмісними порошковими
композитами на структуру та зносостійкість сплавів на основі заліза

Gadzyra M., Davydchuk N., Tymoshenko Ya., Pinchuk M.

Study of the influence of modification with carbon-containing powder
composites on the structure and wear resistance of iron-based alloys.....13

Голуб Т.С., Молчанов Л.С., Семикін С.І.

Термодинамічний аналіз процесів розчинення нітрогену в
залізо-вуглецевому розплаві при різних концентраціях домішок

Golub T., Molchanov L., Semikin S.

Thermodynamic analysis of nitrogen dissolution processes
in iron-carbon melt at different concentrations of impurities26

Зінченко М.Д., Потан О.Ю., Шибакінський В.І.

Застосування непрямих методів оцінки змінення товщини прокату
внаслідок впливу зношення обладнання прокатної кліті

Zinchenko M., Potap O., Shibakinsky V.

The application of indirect methods of assessment of changes
in the thickness of the rolled cage as a consequence of the influence
of the wear of the rolled cage equipment38

Коноводов Д.В., Наконечний В.І.

Експериментальне дослідження поведінки шарів алюмінію та
магнію при прокатці тришарових штаб

Konovodov D., Nakonechnyi V.

An experimental investigation of behavior of aluminum and
magnesium layers during the rolling of three-layer strips52

Курганов І.Д.

Моделювання фрикційної пари стрічкового конвеєра, як елемента технологічного процесу транспортування рудної маси у додатку PDE Toolbox математичного пакету MATLAB

Kurganov I.

Modeling of the friction pair of a belt conveyor as an element of the technological process of ore mass transportation in the PDE Toolbox application of the Matlab mathematical package61

Мищенко В.Ю.

Ідентифікація параметрів комплексної моделі руднотермічної печі та її адекватність

Mishchenko V.

Identification of the parameters of the complex ore thermal furnace model and its adequacy71

Островська К.Ю., Балакін В.Ф., Черський С.С.

Використання нейромережевих технологій для вирішення задачі класифікації дефектів металопрокату

Ostrovska K., Balakin V., Cherskyi S.

The use of neural network technologies to solve the problem of classification of rolled metal defects84

Тимошенко С.М., Нємцев Е.М., Губинський М.В.

Енергоефективні рішення щодо рафінування сталі в електродуговій печі ливарного класу

Timoshenko S., Niemtsev E., Gubinskyi M.

Energy efficient solutions for steel refining in foundry class electric arc furnace99

Тубольцев Л.Г., Петренко В.О., Селегей А.М.

Проблеми науково-технічного розвитку металургійного виробництва

Tuboltsev L., Petrenko V., Selegej A.

Problems of scientific and technical development of metallurgical production 112

УДК 621.774

Бояркін В.В., Ремез О.А., Польща О.С. **Математичне моделювання профілювання труб квадратного поперечного перерізу** // Сучасні проблеми металургії, № 26 – 2023. С. 3 – 12.

Розглянуто способи виробництва профільних труб. Дослідження присвячені перевірці можливості отримання квадратних труб проштовхуванням в одній неприводній кліті в лінії трубоелектрозварювального агрегату. Створено математичну модель процесу з використанням методу скінчених елементів в програмному середовищі QForm. Визначено залежність сили проштовхування, стовщення стінки та увігнутості сторін профілю від геометричних параметрів заготовки.

Бібл. 10, іл. 3.

UDC 621.774

Boiarkin V.V., Remez O.A., Polshcha O.S. **Mathematical modeling of the forming of square cross section hollow profiles** // Modern problems of metallurgy, № 26 – 2023. P. 3 – 12.

Methods of production of hollow profiles are considered. Research is devoted to checking the possibility of obtaining square cross section hollow profiles by pushing in one non-driven stand in the pipe electrowelding unit line. A mathematical model of the process was created using the finite element method in the QForm software environment. The dependence of the pushing force, wall thickness, and curvature of the profile sides on the geometric parameters of the billet was determined.

Ref. 9, fig. 3.

УДК 621.762.666.03

Гадзира М.П., Давидчук Н.К., Тимошенко Я.Г., Пінчук М.О.

Дослідження впливу модифікування вуглевісними порошковими композитами на структуру та зносостійкість сплавів на основі заліза // Сучасні проблеми металургії, № 26 – 2023. С. 13 – 25.

Високодисперсні композиційні порошкові матеріали, які містять в своєму складі карбідні та інші вуглевісні сполуки можуть виконувати роль модифікаторів при створенні високоміцних та зносостійких сплавів на основі заліза. Проте детального вивчення їх впливу на структуру та механічні властивості сплавів на основі заліза не проводилось вітчизняними дослідниками. Вивчено фазовий склад порошкових композицій (лігатур), утворених шляхом взаємодії нанорозмірних карбідів з порошковими металами. Рентгенографічний аналіз синтезованих високодисперсних вуглевісних сполук виявив їх складний структурний стан, що зумовлений впливом атомів середовища та формоутворенням багатокомпонентних фаз твердих розчинів. Досліджено особливості мікроструктури сплаву на основі заліза з додаванням розроблених лігатур та визначена їх твердість. Сплавлення порошкових сумішей порошкового заліза з синтезованими вуглевісними продуктами призводить до формування перлітної структури металокомпозитів, а також областей мікроевтектиків з ледебуритною структурою, що характеризуються дисперсним розміром зерен і високодисперсними включеннями карбідів, що забезпечують високу стійкість до абразивного зношування сплаву. Загартування створених металокомпозитів на основі заліза призводить до значного зростання зносостійкості, що перевершує показники широковідомих зносостійких марок чавуну та сталі.

Бібл. 6, іл. 6, табл. 5.

UDC 621.762.666.03

Gadzyra M., Davydchuk N., Tymoshenko Ya., Pinchuk M. **Study of the influence of modification with carbon-containing powder composites on the structure and wear resistance of iron-based alloys** // Modern problems of metallurgy, № 26 – 2023. P. 13 – 25.

Highly dispersed composite powder materials that contain carbide and other carbonaceous compounds can act as modifiers in the creation of high-strength and wear-resistant iron-based alloys. However, a detailed study of their influence on the structure and mechanical properties of iron-based alloys was not conducted by domestic researchers. The phase composition of powder compositions (ligatures) formed by the interaction of nanosized carbides with powdered metals was studied. X-ray analysis of the synthesized highly dispersed carbon-containing compounds revealed their complex structural

state caused by the influence of environmental atoms and the formation of multicomponent phases of solid solutions. The peculiarities of the microstructure of the iron-based alloy with the addition of developed ligatures were studied and their hardness was determined. The fusion of powder mixtures of powdered iron with synthesized carbon-containing products leads to the formation of a pearlite structure of metal composites, as well as areas of microeutectics with a ledeburite structure, characterized by a dispersed grain size and highly dispersed inclusions of carbides, which provide high resistance to abrasive wear of the alloy. Hardening of the created iron-based metal composites leads to a significant increase in wear resistance, which exceeds the indicators of well-known wear-resistant brands of cast iron and steel.

Ref. 6, fig. 6, table. 5.

УДК 669.184.14

Голуб Т.С., Молчанов Л.С., Семикін С.І. **Термодинамічний аналіз процесів розчинення нітрогену в залізівуглецевому розплаві при різних концентраціях домішок** // Сучасні проблеми металургії, № 26 – 2023. С. 26 – 37.

Шляхом проведених термодинамічних розрахунків проведено оцінку ефективності розчинення нітрогену в залізівуглецевому розплаві при додатковому введенні титану, хрому та алюмінію. Введення хрому у розплав в кількості 0,25-0,05%мас позитивно відображається на розчинності нітрогену у залізівуглецевому розплаві незалежно від вмісту вуглецю, дозволяючи збільшити вміст нітрогену у 32 - 46 рази у порівнянні зі стандартними умовами. Алюміній додатково введений у розплав негативно впливає на вміст нітрогену, знижуючи його кількість навіть при малій кількості введення. Введення титану у розплав є найбільш позитивним при низькому вмісті вуглецю і дозволяє збільшити розчинності нітрогену у 1,0-1,33 рази при вмісті титану від 0,05 до 0,25 %мас. відповідно.

Бібл. 11, іл. 4.

UDC 669.184.14

Golub T., Molchanov L., Semikin S. **Thermodynamic analysis of nitrogen dissolution processes in iron-carbon melt at different concentrations of impurities** // Modern problems of metallurgy, № 26 – 2023. P. 26 – 37.

The effectiveness of nitrogen dissolution in the iron-carbon melt was evaluated by means of thermodynamic calculations with the additional introduction of titanium, chromium and aluminum. Introduction of chromium in the melt in the amount of 0.25-0.05% by mass has a positive effect on the solubility of nitrogen in the iron-carbon melt regardless of the carbon content, allowing to increase the nitrogen content by 32-46 times compared to standard conditions. Aluminum additionally introduced into the melt has a negative effect on the nitrogen content, reducing its amount even with a small amount of introduction. The introduction of titanium into the melt is most positive at a low carbon content and allows to increase the solubility of nitrogen by 1.0-1.33 times at a titanium content of 0.05 to 0.25% by mass. in accordance.

Ref. 11, fig. 4.

УДК 681.532.1, 62-531.1

Зінченко М.Д., Потап О.Ю., Шибакінський В.І. **Застосування непрямих методів оцінки змінення товщини прокату внаслідок впливу зношення обладнання прокатної кліті** // Сучасні проблеми металургії, № 26 – 2023. С. 38 – 51.

Виконано дослідження вимірювання довжини прокату, в основі якого полягає принцип вимірювання довжини прокату по обертах валків. Показано, що застосування мікропроцесорної техніки дозволяє усунути вплив пробуксовування валків і підвищити точність вимірювання довжини прокату. Виконано дослідження процесу прокатки. При дослідженні процесу прокатки вимірювалась довжина розкатів після чистової кліті, температура розкатів перед чистовою кліттю, струм двигуна головного привода чистової кліті, товщина прокату. Результати вимірювання показали наявність низькочастотної складової цих параметрів, яка пов'язана зі зношенням підшипників і калібрів валків, що призводить до збільшення товщини прокату. Обчислення середніх значень довжини прокату, струму двигуна і температури прокату дозволяє виконувати оцінку змінення товщини прокату внаслідок зношення підшипників і калібрів валків і своєчасно компенсувати його вплив на розміри прокату.

Бібл. 3, іл. 8, табл. 3.

UDC 681.532.1, 62-531.1

Zinchenko M., Potap O., Shibakinsky V. **The application of indirect methods of assessment of changes in the thickness of the rolled cage as a consequence of the influence of the wear of the rolled cage equipment** // Modern problems of metallurgy, № 26 – 2023. P. 38 – 51.

A study of measuring the length of rolled products was carried out, which is based on the principle of measuring the length of rolled products by rotation of the rolls. It is shown that the use of microprocessor technology allows to eliminate the effect of slippage of the rolls and to increase the accuracy of measuring the length of rolled products. A study of the rolling process was carried out. When studying the rolling process, the length of the rolls after the finishing cage, the temperature of the rolls before the finishing cage, the motor current of the main drive of the finishing cage, and the thickness of the rolling stock were measured. The measured results showed the presence of a low-frequency component of these parameters, which is associated with the wear of bearings and roll gauges, which leads to an increase in the thickness of the rolled products. Calculating the average values of rolled length, motor current, and rolled temperature makes it possible to evaluate the change in rolled thickness due to the wear of bearings and roll gauges and to compensate for its influence on the dimensions of rolled products in a timely manner.

Ref. 3, fig. 8, table. 3.

УДК 621.771.01:621.771.8

Коноводов Д. В., Наконечний В. І. **Експериментальне дослідження поведінки шарів алюмінію та магнію при прокатці тришарових штаб** // Сучасні проблеми металургії, № 26 – 2023. С. 52 – 60.

У роботі наведено дослідження поведінки шарів при прокатці тришарових біметалевих штаб. Розглянуто тришарові штаби зі сплаву алюмінію та магнію, які були отримані методом спільної гарячої пластичної деформації на прокатному стані. З використанням оптичного мікроскопу досліджено товщину шарів зі сплавів алюмінію та магнію всередині тришарової штаби після пластичної деформації. Розраховано величину відносної деформації шарів зі сплаву алюмінію AW-2017A та сплаву магнію AZ31. Встановлено, що шари зі сплаву алюмінію отримують більшу деформацію ніж шари зі сплаву магнію.

Бібл. 7, іл. 4.

UDC 621.771.01:621.771.08

Konovodov D., Nakonechnyi V. **An experimental investigation of behavior of aluminum and magnesium layers during the rolling of three-layer strips** // Modern problems of metallurgy, № 26 – 2023. P. 52 – 60.

The study of the behavior of layers during rolling of three-layer bimetallic strips is presented in the work. Three-layer strips made of aluminum and magnesium alloy, which were obtained by the method of joint hot plastic deformation on a rolling mill, were considered. Using an optical microscope, the thickness of the layers of aluminum and magnesium alloys inside the three-layer billet after plastic deformation was investigated. The value of the relative deformation of the layers of aluminum alloy AW-2017A and magnesium alloy AZ31 was calculated. It was established that the aluminum alloy layers receive a greater deformation than the magnesium alloy layers.

Ref. 7, fig. 4.

УДК 622: 647.2

Курганов І.Д. **Моделювання фрикційної пари стрічкового конвеєра, як елемента технологічного процесу транспортування рудної маси у додатку PDE Toolbox математичного пакету Matlab** // Сучасні проблеми металургії, № 26 – 2023. С. 61 – 70.

Актуальність роботи визначається в дослідженні аварійних ситуацій, які призводять до зупинки конвеєрної лінії, а це пробуксовування приводної станції одного з стрічкових конвеєрів тракту подачі транспортованої рудної маси, що може бути пов'язано з недостатнім натягом стрічки. Ціль роботи - моделювання фрикційної пари як моделі з розподіленими параметрами для подальшого її використання в розробці оптимальної системи

автоматичного керування. Отримано теплове поле роботи фрикційної пари для різних режимів роботи приводного барабана досліджуваного конвеєра.

Бібл. 5, іл. 1.

UDC 622: 647.2

Kurganov I.D. **Modeling of the friction pair of a belt conveyor as an element of the technological process of ore mass transportation in the PDE Toolbox application of the Matlab mathematical package** // Modern problems of metallurgy, № 26 – 2023. P. 61 – 70.

The relevance of the work is determined by the study of emergency situations that lead to the stoppage of the conveyor line, which is the slippage of the drive station of one of the belt conveyors of the supply path of the transported ore mass, which may be associated with insufficient belt tension. The aim of the work is to model the friction pair as a model with distributed parameters for its further use in the development of an optimal automatic control system. The thermal field of the operation of the friction pair for different modes of operation of the drive drum of the conveyor under study was obtained.

Ref. 5, fig. 1.

УДК 669:621

Міщенко В.Ю. **Ідентифікація параметрів комплексної моделі руднотермічної печі та її адекватність** // Сучасні проблеми металургії, № 26 – 2023. С. 71 – 83.

Розглянута комплексна модель роботи руднотермічної печі. Визначені її налаштувальні параметри, пошук останніх пропонується здійснити шляхом розв'язання розрахункової оптимізаційної задачі за результатами здійснених плавок. Представлена загальна блок-схема реалізації обчислювального експерименту для вибору значень параметрів налаштування моделі. Результати ідентифікації параметрів розглянутої моделі запропонованим оптимізаційним методом за результатами проведених реальних плавок на печі РКЗ-2,5 свідчить про її адекватність й можливість використання для проведення розрахункових експериментів для енергоефективності технологічного процесу, який розглядається.

Бібл. 10, іл. 2, табл. 6.

UDC 669:621

Mishchenko V. Yu. **Identification of the parameters of the complex model of the ore-thermal furnace and its adequacy** // Modern problems of metallurgy, № 26 – 2023. P. 71 – 83.

The complex model of the operation of the ore-thermal furnace is considered. Its setting parameters are determined, the search for the latter is proposed to be carried out by solving the calculated optimization problem based on the results of the performed fusions. The general block diagram of the implementation of the computational experiment for the selection of the values of the model setting parameters is presented. The results of the identification of the parameters of the considered model by the proposed optimization method based on the results of real melting on the RKZ-2.5 furnace indicate its adequacy and the possibility of using it to conduct calculation experiments for the energy efficiency of the technological process under consideration.

Ref. 10, fig. 2, table. 6.

УДК 004.942:681.3.068

Островська К.Ю., Балакін В.Ф., Черський С.С. **Використання нейромережевих технологій для вирішення задачі класифікації дефектів металопрокату** // Сучасні проблеми металургії, № 26 – 2023. С. 84 – 98.

В результаті роботи було розроблено програмну систему для класифікації дефектів металопрокату на базі нейромережевих технологій, яка здатна менш ніж за 1с часу виконувати класифікацію дефекту на зображенні з точністю не менше 90%.

Бібл. 11, іл. 9, табл. 2.

UDC 004.942:681.3.068

Ostrovska K., Balakin V., Cherskyi S. **The use of neural network technologies to solve the problem of classification of rolled metal defects** // Modern problems of metallurgy, № 26 – 2023. P. 84 – 98.

As a result of the work, a software system was developed for the classification of rolled metal defects based on neural network technologies, which is capable of classifying a defect in an image with an accuracy of at least 90% in less than 1 s of time.

Ref. 11, fig. 9, table. 2.

УДК 669.187; 621.365.22

Тімошенко С.М., Нємцев Е.М., Губинський М.В. **Енергоефективні рішення щодо рафінування сталі в електродуговій печі ливарного класу** // Сучасні проблеми металургії, № 26 – 2023. С. 99 – 111.

Проведено чисельне моделювання кінетики десульфурзації сталі в 3-12 т дугових сталеплавильних печах (ДСП) ливарного класу. У «глибокій» сталеплавильній ванні з коефіцієнтом форми 2,5 та пневматичним перемішуванням швидкість видалення сірки збільшується в 5-6,7 разів, порівняно зі стандартною ванною з коефіцієнтом форми 4,5 без перемішування, за рахунок інтенсифікації масообміну в двофазній області та розвитку плівкової десульфурзації. Внесок поглиблення ванни у прискорення видалення сірки становить у середньому 23%. Отримані результати дозволяють очікувати скорочення технологічного періоду в середньому в 1,5 рази, а плавки в цілому на 8–10 %. Економія електроенергії в ДСП малої місткості ливарного класу очікується 60–70 кВт/т.

Бібл. 12, іл. 4, табл. 2.

UDC: 669.187; 621.365.22

Timoshenko S.M., Niemtsev E.M., Gubinski M.V. **Energy efficient solutions for steel refining in foundry class electric arc furnace** // Modern problems of metallurgy, № 26 – 2023. P. 99 – 111.

Numerical modeling of the kinetics of steel desulphurization in 3-12 t steel arc furnaces (PCF) of foundry class was carried out. In a "deep" steel melting bath with a shape factor of 2.5 and pneumatic stirring, the sulfur removal rate increases by 5-6.7 times compared to a standard bath with a shape factor of 4.5 without stirring due to the intensification of mass transfer in the two-phase region and the development of film desulfurization. The effect of deepening the bath on the acceleration of sulfur removal is an average of 23%. The obtained results allow us to expect a shortening of the technological period by an average of 1.5 times, and melting by 8-10% as a whole. Electricity savings in small-capacity chipboard of the foundry class are expected to be 60-70 kWh/t.

Bibl. 12, fig. 4, tab. 3

УДК 669.1.061.6

Тубольцев Л.Г., Петренко В.О., Селегей А.М. **Проблеми науково-технічного розвитку металургійного виробництва** // Сучасні проблеми металургії, № 26 – 2023. С. 112 – 132.

Метою даної роботи є дослідження перспективних напрямів сталого розвитку чорної металургії України в сучасних умовах. Розглянуто основні напрямки стабілізації роботи галузі, що включають: вплив держави на розвиток металургійної галузі, проблеми удосконалення асортименту металургійної продукції, науковий розвиток металургійних технологій, екологічні проблеми чорної металургії, проблеми наукового забезпечення розвитку металургійних технологій, основні напрямки науково-технічних рішень для сталого розвитку металургійного виробництва. Показано, що нині в національній державній політиці не враховуються головні показники розвитку країни – цільові установки, визначення та затвердження критеріїв і параметрів розвитку країни, гласність і контроль їх виконання. Таке становище потребує розроблення промислової політики у металургійній галузі. Аналіз показує, що в країні продовжує загострюватися проблема внутрішнього ринку металопродукції, скорочується асортимент ефективних видів металопродукції, країна все більше орієнтується на експорт сировинних видів металопродукції та

напівфабрикатів. Відзначено, що науково-технічний супровід металургійної галузі має одним з основних чинників розвитку та ефективності виробництва. Використання результатів наукових досліджень є одним з головних чинників зменшення витрат енергоресурсів на виробництво металопродукції. Відзначено, що екологічні проблеми можуть вкрай негативно вплинути на перспективи розвитку металургійного виробництва. Таке становище потребує значних інвестицій у розвиток наукових досліджень та створення нових технологій зменшення вуглецевого сліду під час виробництва металопродукції. Аналіз показує, що за рахунок використання наукового потенціалу та з використанням відомих у світовій практиці технологій в Україні є принципова можливість зменшити енергоспоживання на виробництво металопродукції, поліпшити екологічну ситуацію, зменшити викиди парникових газів. Тому сьогодні надзвичайно актуальним є питання науково-технічного забезпечення інноваційного розвитку ГМК України. Першочергові науково-технічні завдання у цьому напрямку полягають у зменшенні витрат енергоресурсів на виробництво металопродукції та досягнення найкращих світових показників. Показано головні стратегічні цілі та пріоритети розвитку ГМК на сучасному етапі.

Бібл. 14, іл. 8.

UDC 669.1.061.6

Tuboltsev L., Petrenko V., Selegej A. **Problems of scientific and technical development of metallurgical production** // Modern problems of metallurgy, № 26 – 2023. P. 112 – 132.

The purpose of this work is to study promising areas of sustainable development of ferrous metallurgy of Ukraine in modern conditions. The main areas of stabilization of the industry were considered, including: the influence of the state on the development of the metallurgical industry, problems of improving the range of metallurgical products, scientific development of metallurgical technologies, environmental problems of ferrous metallurgy, problems of scientific support for the development of metallurgical technologies, the main directions of scientific and technical solutions for the sustainable development of metallurgical production. It is shown that currently the main indicators of the country's development are not taken into account in the national state policy - target settings, definition and approval of criteria and parameters of the country's development, publicity and control of their implementation. Such a situation requires the development of an industrial policy in the metallurgical industry. The analysis shows that the problem of the internal market of metal products continues to worsen in the country, the assortment of effective types of metal products is decreasing, the country is increasingly oriented towards the export of raw types of metal products and semi-finished products. It was noted that the scientific and technical support of the metallurgical industry is one of the main factors in the development and efficiency of production. The use of the results of scientific research is one of the main factors in reducing the cost of energy resources for the production of metal products. It was noted that environmental problems can have an extremely negative impact on the prospects for the development of metallurgical production. This situation requires significant investments in the development of scientific research and the creation of new technologies for reducing the carbon footprint during the production of metal products. The analysis shows that due to the use of scientific potential and the use of technologies known in world practice in Ukraine, there is a fundamental opportunity to reduce energy consumption for the production of metal products, improve the environmental situation, and reduce greenhouse gas emissions. Therefore, the issue of scientific and technical support for the innovative development of MMC of Ukraine is extremely relevant today. The primary scientific and technical tasks in this direction are to reduce the consumption of energy resources for the production of metal products and achieve the best global indicators. The main strategic goals and priorities of MMC development at the current stage are shown.

Ref. 14, fig. 8.

СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ МЕТАЛУРГІЇ

НАУКОВІ ВІСТІ

№ 26

Технічна редакція: Островська К.Ю.
Комп'ютера верстка: Селівьорстова Т.В.

Здано в набір 03.04.23. Підписано до друку 10.04.23.
Формат А4. Гарнітура Шкільна. Тираж 300. Зам. № 07/23.

Український державний університет науки і технологій
ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій»
49005, Дніпро
st@nmetau.edu.ua

Свідоцт во про державну реєст рацію друкованого засобу масової інформації:
Серія КВ № 8684