

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Вчені ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ, м. Київ:

С.В. Ахонін (головний редактор),
В.О. Березос, Ф.К. Біктагіров, Ю.В. Костецький,
В.А. Костін, І.В. Кривцун, С.В. Римар,
А.І. Устїнов, В.О. Шаповалов;

М.М. Гасик, Аалто Університет, Еспоо, Фінляндія;

М.І. Гречанюк, Інститут проблем
матеріалознавства НАНУ, м. Київ;

О.М. Івасішин, Інститут металофізики
ім. Г.В. Курдюмова НАНУ, м. Київ;

Ю.Г. Квасницька, ФТІМС НАНУ, м. Київ;

П.І. Лобода,

НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», м. Київ;

О.В. Овчинников, ЗНТУ, м. Запоріжжя;

С.В. Петров, Інститут газу НАНУ, м. Київ.

Виконавчий редактор — О.Т. Зельніченко,
Міжнародна Асоціація «Зварювання», м. Київ

Видавець

Міжнародна Асоціація «Зварювання»

Редакція

Д.М. Дяченко (відповід. секретар),
Л.М. Герасименко, Т.Ю. Снегірєва, А.А. Чайка

Адреса редакції

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ,
03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11
Тел.: (38044) 205 23 90

E-mail: patonpublishinghouse@gmail.com;
journal@paton.kiev.ua

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/sem>

Журнал входить до переліку затверджених
Міністерством освіти і науки України видань
для публікації праць здобувачів наукових ступенів
за спеціальностями 132, 133, 136.
Наказ МОН України № 409 від 17.03.2020.

Рекомендовано до друку
редакційною колегією журналу.

Журнал зареєстровано Національною радою України
з питань телебачення і радіомовлення
9 травня 2024 року,
ідентифікатор медіа R30-04567.

ISSN 3041-2331 (Online)

ISSN 3041-2382 (Print)

DOI: <https://doi.org/10.37434/sem>

Передплата 2026

Передплатний індекс 70693

4 випуски на рік (видається щоквартально)

Друкована версія: 1680 грн. за річний комплект
з урахуванням доставки
рекомендованою бандероллю.

Електронна версія: 1680 грн. за річний комплект.

ЗМІСТ*

ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВІ ПРОЦЕСИ

Кривцун І.В., Римар С.В., Губатюк Р.С., Березос В.О., Ахонін Д.С., Селін Р.В. Математичне моделювання процесів тепломасообміну під час електронно-променевого плавлення зливоків титанового сплаву Ti-6Al-7Nb 3

ПЛАЗМОВО-ДУГОВА ТЕХНОЛОГІЯ

Коржик В.М., Терещенко О.С., Строгонов Д.В., Дем'янов О.І., Ганущак О.В. Перспективи застосування ультразвуку при отриманні дисперсних гранул газовим і плазмово-дуговим розпиленням металевих розплавів та компактних матеріалів (Огляд) 19

Петров С.В., Сом О.І., Бондаренко С.Г., Сангінова О.В., Ганчарський М., Рой Е. Реалізація та стійкість процесу газифікації біомаси за допомогою плазмових технологій 29

ЕЛЕКТРОШЛАКОВА ТЕХНОЛОГІЯ

Ворон М.М., Тимошенко А.М., Семенко А.Ю., Скоробагатсько Ю.П., Смірнов О.М., Шваб С.Л. Причини руйнування сталі Fe-25Mn-10Al-1Si-2Ni-2Cr-1,4C-0,1V в процесі гарячої пластичної деформації після електрошлакового переплаву литого електрода з підвищеним вмістом неметалевих включень 51

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Шаповалов В.О., Могилатенко В.Г., Жиров Д.М., Бурнашев В.Р. Промислові технології позадоменного відновлення заліза з рудної сировини та перспективи використання водню для відновлювальних процесів 59

Ямшинський М.М., Лавренюк М.С., Трикозенко Д.І. Дослідження електрошлакового переплаву нержавіючої сталі AISI 304 під різними флюсами 64

*Статті з журналу «Сучасна електрометалургія» вибірково перевидуються англійською мовою в журналі «The Paton Welding Journal»: <https://patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj>

EDITORIAL BOARD

Scientists of E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU, Kyiv:

S.V. Akhonin (Editor in Chief),

V.O. Berezos, F.K. Biktagirov, Yu. V. Kostetskyi, V.A. Kostin, I.V. Krivtsun, S.V. Rymar,

A.I. Ustinov, V.O. Shapovalov;

M.M. Gasik, Aalto University, Espoo, Finland;

M.I. Grechanyuk, Institute for Problems of Material Science of NASU, Kyiv;

O.M. Ivasishyn, G.V. Kurdyumov Institute for Metal Physics of NASU, Kyiv;

Yu.H. Kvasnytska, Physico-Technological Institute of Metals and Alloys, Kyiv;

P.I. Loboda, NTUU «Igor Sykorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv;

O.V. Ovchynnikov, Zaporizhzhzia National Technical University, Ukraine;

S.V. Petrov, The Gas Institute of NASU, Kyiv.

Executive Editor — O.T. Zelnichenko,

International Association «Welding», Kyiv, Ukraine.

Publisher

International Association «Welding»

Editors

D.M. Diachenko (execut. secretary),
L.M. Gerasymenko, T.Yu. Snegiryeva, A.A. Chaika

Address of Editorial Office

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU,
11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine
Tel.: (38044) 205 23 90

E-mail: patonpublishinghouse@gmail.com;
journal@paton.kiev.ua

<https://patonpublishinghouse.com/eng/journals/sem>

The Journal is included into the list of publications approved by the Ministry of Education and Science of Ukraine for the publication of works of applicants for academic degrees in specialties 132, 133, 136. Order of the MES of Ukraine № 409 of 17.03.2020.

Recommended for printing by the Editorial Board of the Journal.

The Journal was registered by the National Council of Ukraine on Television and Radio Broadcasting on 09.05.2024,
carrier identifier R30-04567.

ISSN 3041-2331 (Online)

ISSN 3041-2382 (Print)

DOI: <https://doi.org/10.37434/sem>

Subscription 2026

Subscription index 70693

4 issues per year (issued monthly),
back issues available.

128 Euros, subscriptions for the printed (hard copy) version, air postage and packaging included.

96 Euros, subscriptions for the electronic version (sending issues of Journal in pdf format or providing access to IP addresses).

CONTENTS*
ELECTRON BEAM PROCESSES

Krivtsun I.V., Rymar S.V., Gubatyuk R.S., Berezos V.O., Akhonin D.S., Selin R.V. Mathematical modeling of heat and mass exchange processes during electron beam melting of ingots of titanium alloy Ti-6Al-Nb 3

PLASMA-ARC TECHNOLOGY

Korzyk V.M., Tereshchenko O.S., Strohonov D.V., Demianov O.I., Ganushchak O.V. Prospects of ultrasound application in the production of dispersed granules by gas and plasma-arc atomization of metal melts and compact materials (Review) 19

Petrov S.V., Som O.I., Bondarenko S.G., Sanginova O.V., Ganczarski M., Rój E. Implementation and sustainability of the biomass gasification process using plasma technologies 29

ELECTROSLAG TECHNOLOGY

Voron M.M., Tymoshenko A.M., Semenko A.Yu., Skorobagatko Yu.P., Smirnov O.M., Schwab S.L. Causes for Fe-25Mn-10Al-1Si-2Ni-2Cr-1.4C-0.1V steel fracture due to hot plastic deformation after electroslag remelting of a cast electrode with an increased content of non-metallic inclusions 51

MATERIALS SCIENCE

Shapovalov V.O., Mogylatenko V.G., Zhyrov D.M., Burnashev V.R. Industrial technologies for out-of-blast furnace reduction of iron from ores and prospects of using hydrogen for the reduction processes 58

Yamshynskyi M.M., Lavreniuk M.S., Trykozenko D.I. Investigations of ESR of AISI 304 stainless steel under different fluxes 64

*Articles from «Suchasna Elektrometalurhiya» (Electrometallurgy Today) journal are selectively translated into English and included into the contents of «The Paton Welding Journal»: <https://patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj>

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОМАСООБМІНУ ПІД ЧАС ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ПЛАВЛЕННЯ ЗЛИВКІВ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ Ti–6Al–7Nb

І.В. Кривцун, С.В. Римар, Р.С. Губатюк, В.О. Березос, Д.С. Ахонін, Р.В. Селін

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: elmag@paton.kiev.ua

Представлено результати математичного моделювання температурних полів і гідродинамічних ламінарних потоків рідкого металу під час електронно-променевого плавлення зливків титанових сплавів. Розрахунки виконано за допомогою розробленої тривимірної математичної моделі на основі методу скінчених елементів з врахуванням ряду спрощень і припущень. Модель дозволяє визначити закономірності теплових і гідродинамічних процесів, що протікають у прохідному водоохолоджуваному кристалізаторі під час плавлення зливка, та визначити геометрію міжфазової перехідної зони ліквідус–солідус, а відповідно і фронту кристалізації металу, який суттєво впливає на якість металу під час формування зливка. Розраховані параметри процесу плавлення зливків малого діаметра 110 мм титанового сплаву медичного призначення Ti–6Al–7Nb з таким фронтом кристалізації, для якого забезпечується одержання металу високої якості з однорідною структурою. З'ясовано, що на тепломасообмін в рідкому металі суттєво впливає потужність електронного променя і її розподіл по поверхні ванни, а теплопередача в основному обумовлена рухом розплаву. Бібліогр. 30, рис. 16.

Ключові слова: електронно-променеве плавлення, титанові сплави, математичне моделювання, тепломасообмін, фронт кристалізації металу

Вступ. Легкі, міцні, біологічно сумісні і нетоксичні імпланти й ендопротези тривалого терміну використання із металів і спеціальних сплавів медичного призначення широко застосовуються в хірургії. Біля 60 % ринку займають імпланти, вироблені із металу, а титан і його сплави є лідером серед даних виробів [1], оскільки їх міцність дорівнює сплавам із кобальту, перевищує нержавіючі сталі й має у два рази нижчий модуль пружності (55...112 ГПа), тоді як у хром-кобальтового сплаву він дорівнює 240 ГПа, а у хром-нікелевих нержавіючих сталях — 210 ГПа. Такий низький показник пружності вкрай важливий для суглобових й кісткових ендопротезів і імплантатів, оскільки він більш близький до показників кісток людини, де в повздовжньому напрямку він складає 27,8...30,0 ГПа, а в радіальному і азимутальному напрямках — 11,0...11,5 ГПа.

В медицині широко застосовується корозійностійкий малотоксичний [2] сплав Ti–6Al–4V, який за біологічною сумісністю перевершує нержавіючі сталі й кобальтові сплави. В сплаві Ti–6Al–4V вміст небезпечного ванадію на порядок менше (4 % за масою) в порівнянні із нержавіючими сталями, у яких масова концентрація токсичних нікелю та хрому перевищує 30 %.

В сучасній металургії стоїть завдання удосконалення технології для виплавляння новітніх медичних титанових сплавів без вмісту токсич-

них легуючих елементів. На даний час це новітні титанові сплави з ніобієм, ніобієм і цирконієм й молібденом і цирконієм, які близькі за своїми механічними показниками до сплаву Ti–6Al–4V [3]. Сплави нетоксичні для організму людини, мають відмінну біологічну сумісність, корозійну стійкість, пластичність. Так, модуль пружності сплаву Ti–6Al–7Nb має значення нижче 40 ГПа.

В подальшому титанові сплави можуть замінити в протезуванні нержавіючі сталі і кобальтові сплави, а модифікація поверхні виробів, така як механічна, термічна, криогенна, електроерозійна, хімічне оброблення, напилювання та ін., ще суттєвіше покращує модуль пружності, корозійно-і зносостійкість, зменшення вивільнення іонів для запобігання запаленням, антибактеріальні властивості, біосумісність, адгезію [4–11].

В Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України розроблено технологію електронно-променевого плавлення (ЕПП) для виробництва бездефектних високоякісних зливків титанових сплавів з гарантованим хімічним складом, в тому числі і медичного призначення.

Одним із ключових факторів, що впливають на якість плавлення зливків титанових сплавів є кристалізація металу. Перетворення металу із рідкого в твердий стан супроводжується складними процесами тепло- і масоперенесення й швидкісними фізико-хімічними процесами. Нерівномір-

І.В. Кривцун — <https://orcid.org/0000-0001-9818-3383>, С.В. Римар — <https://orcid.org/0000-0003-0490-4608>,
Р.С. Губатюк — <https://orcid.org/0000-0002-0851-743X>, В.О. Березос — <https://orcid.org/0000-0002-5026-7366>,
Д.С. Ахонін — <https://orcid.org/0009-0000-2054-4054>, Р.В. Селін — <https://orcid.org/0000-0002-2990-1131>

ність температурного поля в об'ємі металу зливка впливає на формування профілю фронту кристалізації та веде до відмінності структури і хімічного складу металу по центру і периферії зливка, присутністю усадкових і ліквацийних явищ тощо. Це суттєво позначається на якості кінцевої структури металу зливків.

Проведення натурних експериментів металургійних процесів пов'язано з суттєвими матеріальними затратами, що обумовлює перспективність використання CFD-моделювання (CFD — Computational Fluid Dynamics) високотемпературних процесів тепло- і масообміну. Грунтуючись на невеликій кількості експериментальних даних, чисельне моделювання з суттєво меншими матеріальними затратами, дозволяє розраховувати та отримувати з достатньою для практики точністю прогнозовані якісні і кількісні картини явищ, що відбуваються під час протікання металургійних процесів.

Чисельні методи розрахунку і сучасні комп'ютерні пакети програм математичного моделювання дозволяють застосовувати теплофізичні показники у вигляді апроксимаційних функцій від температури, що суттєво наближає розрахунки до реальних процесів.

Знання про процеси тепломасообміну у високотемпературних розплавах титанових сплавів під час їх ЕПП і формування зливків є актуальним завданням сучасної металургії. Знання про форму фронту кристалізації металу є одним із ключових у виборі технологічних режимів для виплавлення якісних зливків. Однорідна структура і рівномірний розподіл легуючих елементів в зливку забезпечується у випадку більш плоского фронту кристалізації, в результаті чого наявний більш рівномірний розподіл температур в зливку і це є передумовою в отриманні гомогенної структури металу.

Метою роботи є здійснення математичного моделювання теплових і гідродинамічних процесів ЕПП циліндричного зливка діаметром 110 мм титанового сплаву Ti–6Al–7Nb із масовою швидкістю його витягування 20 кг/год з виявленням основних закономірностей протікання процесів тепломасообміну під час виплавлення і визначення необхідних режимів плавлення. Для цього необхідно вирішити наступні задачі: розробити математичну модель для розрахунку теплових і гідродинамічних процесів в зливку в разі ламінарного характеру руху потоків рідкого металу; врахувати теплофізичні характеристики металу з їх зміною в міжфазових перехідних зонах; розрахунковим шляхом визначити розподіл температурних полів в зливку і ламінарних гідродинамічних потоків

у ванні розплаву, а відповідно і форму профілю кристалізації металу.

Досягнення цієї мети дасть можливість визначити ключові технологічні параметри плавлення зливків, що є актуальним питанням розрахункового пошуку необхідних режимів процесу плавлення з виключенням вкрай коштовних натурних експериментів.

Матеріали і методи дослідження. Об'єктом дослідження в роботі є математична модель процесів тепломасообміну в разі ЕПП зливка титанового сплаву. Предметом дослідження — характеристики гідродинамічних потоків в розплаві і температурних полів у зливку.

Основні гіпотези досліджень полягають у наступному: представлення характеру руху гідродинамічних потоків рідкого металу як ламінарного надасть більш наближений результат до реального профілю кристалізації металу, ніж його турбулентне представлення [12]; місце положення електронного променя на поверхні ванни розплаву, його потужність і швидкість витягування зливка є тими факторами, які в основному впливають на форму фронту кристалізації металу, а відповідно і на якість металу в зливку.

При виконанні роботи були введені наступні припущення: рідка і тверда фази металу зливка розглядаються як одна область з рідкою фазою, а твердому металу відповідає об'єм, в якому рух штучно пригнічено гальмівною силою Дарсі (за винятком швидкості витягування зливка) та задіяна фіксована розрахункова сітка в методі скінчених елементів; міжфазова границя сплаву ліквідус–солідус ($L-S$) являє собою в'язку перехідну зону, в якій границі визначаються температурами ліквідусу і солідусу, а параметри металу змінюються за запропонованим законом відносно об'ємної частки цих фаз; об'ємна частка металу перехідної зони від температури є згладженою функцією F_{L-S} , що плавно змінюється від 0 до 1, із використанням математичної функції помилок erf; використовуються апроксимаційні залежності теплофізичних параметрів титанових сплавів Ti–6Al–4V і Ti–6Al–7Nb із згладженими ступінчастими фазовими переходами із застосуванням функції erf з штучно розширеними границями температур у фазових переходах [13]; розподіл теплової потужності електронного променя по поверхні дзеркала ванни змінюється за законом Гауса; оскільки в зливку досліджуваного сплаву Ti–6Al–7Nb візуально не простежуються лінії профілів кристалізації металу, дослідне визначення цих профілів проводили на близькому за фізичними властивос-

Таблиця 1. Граничні умови математичної моделі [12, 17]

Границя	Теплові потоки	Гідродинамічні потоки
G_1	$T = T_{in}$ або $-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = \rho \int_{T_{in}}^T C_p dT \cdot \mathbf{u}_{in} \cdot \mathbf{n}$	$\mathbf{n}^T(-p\mathbf{I} + \mathbf{K}) \cdot \mathbf{n} = -p_0;$ $\mathbf{u} \cdot \mathbf{t} = 0$
G_2	$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = q_{eb} - q_{ev} - q_{rad2};$ $q_{eb} = P_{eb}/S_{dz};$ $q_{rad2} = \varepsilon_2 \sigma (T_{vault}^4 - T^4)$	$\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = 0;$ $\mathbf{K} - (\mathbf{K} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{n} = 0$
G_3	$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = \begin{cases} -q_{conv3}, T_{in} \geq T > T_L; \\ -q_{conv3} - q_{rad3}, T_L \geq T \geq T_{sep}; \\ -q_{rad3}, T < T_{sep}; \end{cases}$ $q_{conv3} = h_3(T_{cryst} - T);$ $h_3 = h_L + (h_{in} - h_L) \frac{T - T_L}{T_{in} - T_L};$ $q'_{conv3} = h'_3(T_{cryst} - T); h'_3 = h_L F_{L-sep} + h_{sep}(1 - F_{L-sep});$ $q'_{rad3} = \varepsilon'_3 \sigma (T_{cryst}^4 - T^4); \varepsilon'_3 = \varepsilon_3(1 - F_{L-sep}); q_{rad3} = \varepsilon_3 \sigma (T_{cryst}^4 - T^4)$	
G_4	$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = q_{rad4};$ $q_{rad4} = \varepsilon_4 \sigma (T_{wall}^4 - T^4)$	
G_5	$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = 0$ або $-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = \rho \int_{T_{out}}^T C_p dT \cdot \mathbf{u}_0 \cdot \mathbf{n}$	
G_6		
G_7		$\mathbf{u} = \mathbf{u}_0$

тями експериментальному титановому сплаві, в якому профілі кристалізації явно виражені.

Прийняті наступні спрощення: рідкий метал заливається у кристалізатор безперервно з однаковою швидкістю і забезпечується постійна швидкість витягування зливка, що дозволяє розглядати задачу, як стаціонарний процес; дзеркало ванни розплаву є пласкою поверхнею; розплави металу прийнято як нестисливу в'язку рідину; теплоємність у зонах фазових переходів α - β і L - S сплаву враховує еквівалентну теплоємність і теплоємність від прихованої теплоти фазових переходів; втрати на випаровування з поверхні розплаву враховують тільки випаровування титану.

В математичній моделі задіяні фундаментальні закони збереження енергії, імпульсу і маси та відповідні їм рівняння тепломасообміну, що ґрунтуються на рівняннях Фур'є і Нав'є-Стокса. Для розрахунків використовували чисельний метод скінченних елементів. Виплавка зливків відбувалася на науково-дослідному обладнанні ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України [14–16].

Стаття є продовженням досліджень, опублікованих авторами в роботі [12].

До оригінальності роботи слід віднести те, що вперше проведені дослідження ламінарного характеру руху потоків розплаву для вибраного

діаметру кристалізатора і швидкості витягування зливка сплаву $Ti-6Al-7Nb$ в процесі ЕПП.

Практичне значення роботи полягає у виплавленні якісних зливків титанового сплаву з гомогенною структурою металу.

Результати досліджень. Математична модель теплових і гідродинамічних процесів в зливку циліндричної форми в разі ламінарного характеру переміщення розплаву металу. Запишемо базові рівняння [12, 17–19], використані в моделі. Рівняння теплопередачі Фур'є в разі ламінарного руху рідкого металу для стаціонарного процесу записується у вигляді [18, 20, 21]:

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = 0; \mathbf{q} = -\lambda \nabla T,$$

де ρ — густина металу, $кг/м^3$; C_p — питома теплоємність металу, $Дж/(кг \cdot К)$; \mathbf{u} — вектор швидкості руху металу, $м/с$; ∇ — оператор набла, $м^{-1}$; T — температура, $К$; \mathbf{q} — вектор питомого теплового потоку за рахунок теплопровідності (густина теплового потоку), $Вт/м^2$; λ — коефіцієнт молекулярної теплопровідності, $Вт/(м \cdot К)$.

В математичній моделі теплопідведення від електронного променя і розплаву, що заливається, врівноважується тепловідведенням від: випромінювання і випаровування з дзеркала ванни металу; тепловіддачі з бічної поверхні зливка в кристалізатор; випромінювання з бічної поверх-

ні стінки зливка на стінку кристалізатора нижче границі відокремлення їх поверхонь і появою між ними зазору (пов'язано з усадкою металу зливка із зниженням його температури); випромінювання з поверхні зливка за межами кристалізатора. Ці фактори враховуються граничними умовами [12, 17], виписаними в табл. 1.

Математичне моделювання гідродинамічних процесів за безперервної подачі нестисливого розплаву титану в кристалізатор виконували за моделлю рівнянь Нав'є–Стокса для ламінарного потоку. Для стаціонарного процесу модель має вигляд [12, 17, 20, 22]:

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot (-p\mathbf{I} + \mathbf{K}) + \mathbf{F}_d + \rho \mathbf{g};$$

$$\mathbf{K} = \mu[\nabla \cdot \mathbf{u} + (\nabla \cdot \mathbf{u})^T]; \rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0.$$

Тут p — усереднене значення тиску, Па; \mathbf{I} — одиничний тензор; \mathbf{K} — тензор в'язких напружень, Па; \mathbf{F}_d — вектор гальмівної сили Дарсі, яка введена штучно для зменшення і пригнічення швидкостей у в'язкій і твердій зонах, Па/м; \mathbf{g} — вектор прискорення вільного падіння, м/с²; μ — коефіцієнт молекулярної в'язкості рідкого металу, Па·с.

У верхньому рівнянні в останньому члені ρ є функцією температури T . Тут задіяна ідея наближення Буссінеска, в якій добуток $\rho \mathbf{g}$ впливає на конвекцію під час зміни T , оскільки \mathbf{g} є достатньою величиною, щоб цей добуток був значимий.

Гальмівна сила Дарсі, Па/м, розраховується за формулою з робіт [20, 23]:

$$\mathbf{F}_d = \frac{C(1-F_{L-S})^2}{q + F_{L-S}^3}(\mathbf{u} - \mathbf{u}_{cast}),$$

де $C \approx 10^2 \dots 10^4$ кг/(м³с); $q \approx 10^{-2} \dots 10^{-4}$ — величини, співвідношення яких C/q має бути достатнім, щоб пригнітити рух в твердому металі, коли $F_{L-S} = 0$ (за винятком швидкості плавлення зливка

\mathbf{u}_{cast}). В рідкому металі, коли $F_{L-S} = 1$, сила Дарсі $\mathbf{F}_d = 0$ і не повинна впливати на рух [23]. В перехідній зоні течія відповідає силі Дарсі. Тут F_{L-S} — апроксимаційна функція, яка визначає розподіл об'ємів рідкого і твердого металу в двофазній зоні ліквідус–солідус в діапазоні температур $T_{L-S} \dots T_S$.

Гідродинамічна задача використовує граничні умови [12, 17] із табл. 1.

На рис. 1 схематично представлена 1/2 частини зливка за його умовного перерізу вздовж вертикальної осі симетрії по середині умовної плями на поверхні ванни від струменя рідкого металу, що заливається у ванну, з позначенням геометричних областей $G_1 \dots G_7$. Тобто розглядається половина моделі, оскільки в цьому перерізі його умовні частини симетричні і ідентичні. Кількість вузлів скінченно-елементної сітки налічує $3,1 \cdot 10^6$.

Границя G_1 , яка обмежена площею заливання розплаву в кристалізатор є входом в систему і її можна визначити або ізотермічним процесом з умовою 1-го роду (перше рівняння), де T_{in} — температура металу на вході (температура металу, що заливається із проміжної ємності [24]), або ізобаричним процесом з умовою 2-го роду для відкритої стінки (друге рівняння [12]), де \mathbf{n} — вектор нормалі до поверхні; \mathbf{u}_{in} — вектор швидкості струменя розплаву на вході. Тут p_0 — початкове значення тиску в місці входу потоку розплавленого металу на поверхні ванни, Па; \mathbf{t} — вектор дотичної до поверхні.

Граничними умовами для швидкості потоку в кристалізаторі є відсутність проникнення через його стінки $\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = 0$ та наявність зсувних напружень. Тому задача гідродинаміки вирішена з припущенням присутності ковзання вздовж границі. Умовою потрапляння потоку рідкого металу на поверхню ванни, навпаки, є наявність проникнення в ванну $\mathbf{u} \cdot \mathbf{t} = 0$, але тільки нормально до поверхні, з відсутністю зсувних напружень — без ковзання вздовж границі в бічних напрямках.

На границі G_2 , яка обмежена площею дзеркала розплаву металу в кристалізаторі, за виключенням границі G_1 , наявне нагрівання розплаву від електронного променя (умова 2-го роду), його остигання за рахунок випаровування (умова 2-го роду) і випромінювання (умова 3-го роду) для якої: q_{eb} — питомий тепловий потік від електронного променя, що нагріває цю поверхню, Вт/м²; P_{eb} — теплова потужність від електронного променя, Вт; S_{dz} — площа поверхні дзеркала ванни розплавленого металу, м², $S_{dz} = \pi r^2$; r — радіус дзеркала ванни розплавленого металу, м. Тепловий потік q_{eb} розподіляється по поверхні дзеркала ванни розплавленого металу зазвичай рівномірно або (й)

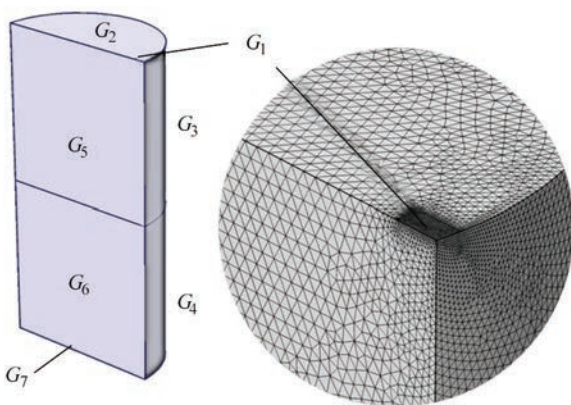


Рис. 1. Геометрична модель та фрагмент сітки скінченних елементів в області заливання металу

за Гаусовим розподілом по радіусу. В останньому випадку враховується Гаусовий розподіл теплової потужності від електронного променя на поверхні ванни і радіус плями від променя; q_{ev} — питомий тепловий потік, обумовлений випаровуванням рідкого металу з поверхні дзеркала ванни, Вт/м²; q_{rad2} — питомий тепловий потік випромінювання з поверхні дзеркала ванни рідкого металу, Вт/м² [25]; ε_2 — безрозмірний коефіцієнт приведенного ступеня чорноти системи поверхонь тіл рідкий метал дзеркала ванни – склепіння вакуумної камери, між якими відбувається процес променевого теплообміну; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) — постійна Стефана–Больцмана; T_{vault} — температура склепіння вакуумної камери над дзеркалом ванни. Коефіцієнт приведенного ступеня чорноти системи поверхонь двох тіл a і b на i -й границі вираховується за формулою [26]:

$$\varepsilon_i = (\varepsilon_a^{-1} + \varepsilon_b^{-1} - 1)^{-1};$$

ε_a і ε_b — коефіцієнти ступеня чорноти відповідних поверхонь.

На границі G_3 , яка обмежена стінками кристалізатора присутній як кондуктивний, так і променевий теплообмін (умови 3-го роду), на якій: q_{conv3} — питомий тепловий потік у випадку кондуктивного теплообміну, Вт/м², що проходить по висоті через ділянку стінки кристалізатора із температурою T_{cryst} , яка контактує із рідким металом, що має температуру вище температури ліквідуса T_L [25]; h_3 — коефіцієнт тепловіддачі з поверхні рідкого металу зливка, який інтегрально враховує тепловіддачу від нього через стінку кристалізатора до охолоджувальної води, Вт/(м²·К). На цій ділянці він прийнятий таким, що зі зниженням температури розплаву лінійно зменшується від значення h_m до значення h_L ; q'_{conv3} — питомий тепловий потік у випадку кондуктивного теплообміну, Вт/м², що проходить по висоті через ділянку стінки кристалізатора, яка контактує із металом зливка, що має температуру нижче температури ліквідуса T_L і вищу температури відривання зливка від стінки кристалізатора T_{sep} в зв'язку з усадкою металу за рахунок його остигання; h'_3 — коефіцієнт тепловіддачі з поверхні металу зливка, який інтегрально враховує тепловіддачу від нього через стінку кристалізатора до охолоджувальної води, Вт/(м²·К). На цій ділянці він прийнятий таким, що зі зниженням температури металу зливка h'_3 зменшується по закону апроксимаційної функції F_{L-sep} (по аналогії з функцією F_{L-S}) від значення h_L до значення h_{sep} ; q'_{rad3} — питомий тепловий потік від випромінювання з поверхні металу зливка, Вт/м², що потрапляє на ділянку стінки кристалізатора з

температурою металу зливка нижче температури ліквідуса T_L і вище температури відривання зливка від стінки кристалізатора T_{sep} ; ε'_3 — безрозмірний коефіцієнт приведенного ступеня чорноти системи поверхонь тіл на цій ділянці; ε_3 — безрозмірний коефіцієнт приведенного ступеня чорноти системи поверхонь тіл метал зливка–стінка кристалізатора, між якими відбувається процес променевого теплообміну; q_{rad3} — питомий тепловий потік від випромінювання з поверхні металу зливка, Вт/м², що потрапляє на ділянку стінки кристалізатора з температурою металу зливка нижче температури відривання зливка від стінки кристалізатора T_{sep} .

На границі G_4 , що обмежена вертикальними стінками зливка, який вийшов із кристалізатора, присутній лише променевий теплообмін (умова 3-го роду), де q_{rad4} — питомий тепловий потік випромінювання з бічної поверхні металу зливка, Вт/м², що потрапляє на стінку вакуумної камери із температурою T_{wall} ; ε_4 — безрозмірний коефіцієнт ступеня чорноти системи поверхонь тіл метал зливка–стінка вакуумної камери на цій ділянці.

На границях G_5 і G_6 , які обмежені площиною перерізу, що проходить вздовж вертикальної осі симетрії зливка по його висоті спостерігається умова 2-го роду.

Границя G_7 обмежена площиною поперечного перерізу нижньої частини зливка на такій відстані від його верхньої частини, де теплові процеси вже не впливають на теплові процеси у його верхній частині в області фронту кристалізації металу. Ця границя є умовним виходом із системи. Відстань до неї визначається ітераційним розрахунковим шляхом. На цій границі можна вибрати або умову 2-го роду адіабатичного процесу закритої стінки (теплоізоляції) (перше рівняння), або умову 2-го роду ізобаричного процесу для відкритої стінки (друге рівняння [12]), де T_{out} — орієнтовне значення температури на границі G_7 , яке уточнюється під час здійснення розрахунків; \mathbf{u}_0 — вектор швидкості витягування зливка, м/с.

Склепіння і стінки вакуумної камери мають водяне охолодження.

Для розрахунку теплових і гідродинамічних процесів з наявним фазовим переходом в металі застосовано чисельний метод скінчених елементів з фіксованою розрахунковою сіткою, в якому рідка і тверда фази розглядаються як одна область. Міжфазова область знаходиться між температурами T_L і T_S і врахована як в'язка перехідна зона, параметри якої змінюються відносно об'ємних часток фаз за певним законом. Рідка фаза наявна в разі температури вище температури ліквідуса T_L , а

тверда фаза — в разі температури нижче температури солідуса T_S .

Об'ємна частка рідини F_{L-S} у двофазній зоні від температури описана згладженою функцією з використанням функції помилок erf, яка є внутрішньою функцією багатьох комп'ютерних розрахункових пакетів програм:

$$F_{L-S}(T) = \begin{cases} 0, & T < T_S; \\ \frac{y_{\max} - y_{\min}}{2} \times \\ 1, & T_L < T, \end{cases} \\ \times \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{x - \frac{x_{\min} + x_{\max}}{2}}{\frac{x_{\max} - x_{\min}}{x_{\max, \operatorname{erf}} - x_{\min, \operatorname{erf}}}} \right) \right] + \\ + y_{\min}, \quad T_S \leq T \leq T_L;$$

де $y_{\min} = 0$, $y_{\max} = 1$; x_{\min} , x_{\max} — задані мінімальне і максимальне значення по осі абсцис, за яких мінімальне і максимальне значення функції F_{L-S} наближаються до 0 і 1 (тут $x_{\min} = T_S$, $x_{\max} = T_L$); $x_{\min, \operatorname{erf}}$, $x_{\max, \operatorname{erf}}$ — мінімальне і максимальне значення по осі абсцис самої функції erf, за яких вона наближається до значень по осі ординат -1 і 1 . Зазвичай за $x_{\min, \operatorname{erf}} = -2$, функція $\operatorname{erf}(-2) = -0,99532$, а за $x_{\max, \operatorname{erf}} = 2$, функція $\operatorname{erf}(2) = 0,99532$, що є достатнім наближенням до -1 і 1 . Але за необхідності більшого наближення можна взяти значення $x_{\min, \operatorname{erf}} = -e$, де функція $\operatorname{erf}(-e) = -0,99988$, а для $x_{\max, \operatorname{erf}} = e$, функція $\operatorname{erf}(e) = 0,99988$.

У двофазній зоні переходу ліквідус–солідус крива F_{L-S} має зростаючу залежність, а для $(1 - F_{L-S})$ — спадаючу (рис. 2). За аналогією з функцією F_{L-S} була застосована і функція $F_{\alpha-\beta}$ у відповідному температурному діапазоні α - β фазового переходу.

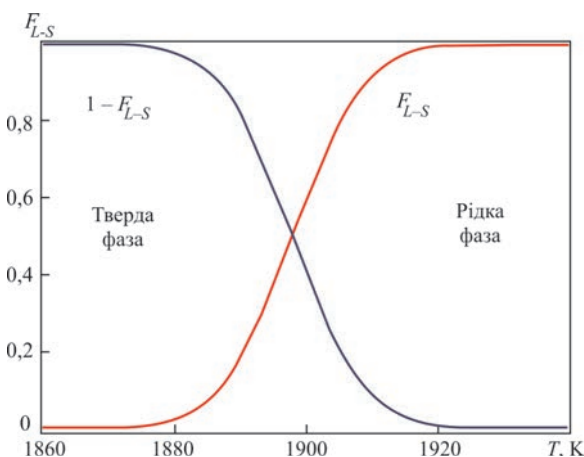


Рис. 2. Залежність об'ємної частки рідини від температури в двофазній зоні в разі з використання функцій F_{L-S} і $(1 - F_{L-S})$

Для сплаву, що розглядається, задані температури: на штучно розширених границях α - β фазового переходу $T_\alpha = 1253$ К, $T_\beta = 1283$ К для фактичної температури $T_{\alpha-\beta} = 1283$ К [27]; на границях S - L фазового переходу $T_S = 1873$ К, $T_L = 1923$ К, з фактичною температурою $T_{L-S} = 1923$ К [27]; температура відривання зливка від стінки кристалізатора $T_{sep} = 1640$ К; температура металу на вході в кристалізатор $T_{in} = 2061$ К. Прихована теплота фазових переходів (зміна ентальпії системи) [27]: $H_\alpha - H_{25} = 6,36 \cdot 10^5$ Дж/кг, $H_\beta - H_{25} = 6,84 \cdot 10^5$ Дж/кг і $H_{\alpha-\beta} = H_\beta - H_\alpha = 4,8 \cdot 10^4$ Дж/кг; $H_S - H_{25} = 1,180 \cdot 10^6$ Дж/кг, $H_L - H_{25} = 1,466 \cdot 10^5$ Дж/кг і $H_{L-S} = H_L - H_S = 2,86 \cdot 10^5$ Дж/кг; H_{25} — початкова ентальпія системи за 25 °С (298 К).

Теплофізичні параметри враховують їх зміни від температури і фазові переходи α - β і L - S , а питома теплоємність металу враховує також приховане тепло фазових переходів, розрахунок яких здійснювали за методикою роботи [18].

Чисельний метод скінчених елементів чутливий до розривів і ступінчастих стрибків значень функцій, коли метод не завжди може знайти рішення і відбувається збій в розрахунках. Ступінчасті зміни теплофізичних характеристик сплавів титану присутні на α - β і L - S фазових переходах. Варто зробити таке математичне описання функцій, щоб здійснити плавний перехід значень в зоні ступінчастих стрибків. Для цього застосований відомий в моделюванні теплових процесів підхід невеликого штучного розширення діапазонів таких зон [13], в яких значення характеристик плавно змінюється. У випадку, що розглядається, це зручно реалізувати функціями $F_{\alpha-\beta}$, $1 - F_{\alpha-\beta}$, F_{L-S} , $1 - F_{L-S}$ з урахуванням зростання, або спадання значень у фазових переходах. Апроксимаційні залежності теплофізичних параметрів виконані саме таким чином (рис. 3) [12].

На рис. 3 наведені апроксимаційні криві задіяних в розрахунках змодельованих теплофізичних характеристик титанового сплаву Ti-6Al-4V від температури, одержані по даним роботи [27]. Подібні залежності для сплаву Ti-6Al-7Nb не виявлені у літературних джерелах. Але характеристики цих споріднених сплавів дуже близькі, тому залежності для першого сплаву з достатньо близьким наближенням можна застосувати для другого сплаву. Більш того, питома теплоємність C_p для сплаву Ti-6Al-7Nb може бути уточнена за існуючими методами.

Для приблизного розрахунку теплоємності титанових сплавів можна застосувати підхід з використанням правила Неймана–Коппа (правило адитивності теплоємності). Це емпіричний метод

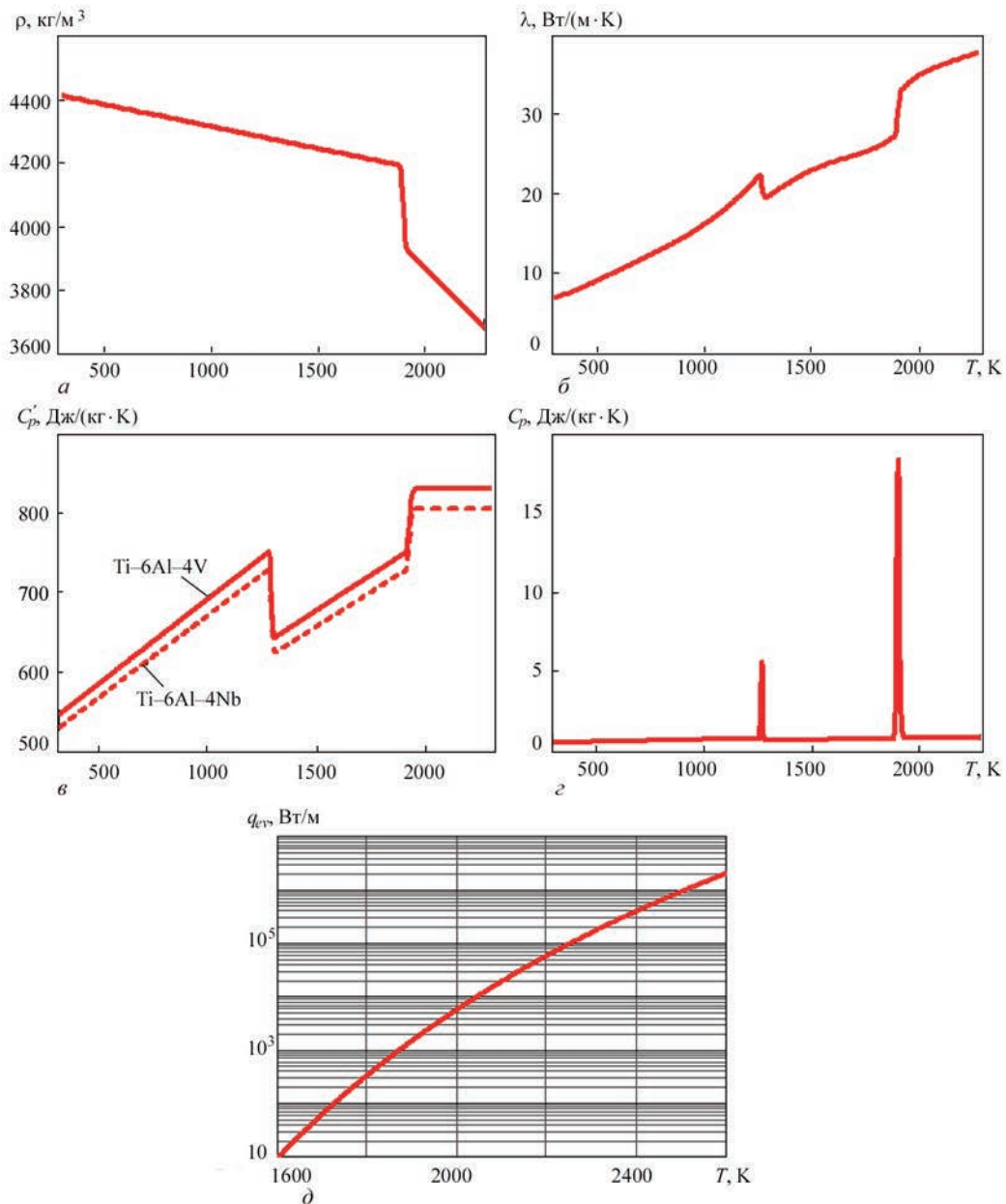


Рис. 3. Апроксимаційні залежності змодельованих теплофізичних параметрів титанового сплаву Ti-6Al-7Nb від температури T : a — густини ρ ; b — теплопровідності λ ; c — питомої теплоємності C_p' ; d — питомої теплоємності C_p із врахуванням прихованої теплоти фазових переходів α - β і L - S ; e — втрат на випаровування q_{ev} з поверхні розплаву Ti

для оцінки питомої теплоємності багатоконпонентних сплавів та складних матеріалів на основі теплоємностей їх складових елементів. Підхід ґрунтується на припущенні, що загальна питома теплоємність сплаву є сумою теплоємностей його окремих компонентів. Для наближеної оцінки питомої теплоємності сплаву C_p використовується співвідношення виду:

$$C_p = \sum_{i=1}^n N_i C_{p,i},$$

де N_i — масові частки i -х компонентів сплаву, %; $C_{p,i}$ — питомі теплоємності i -х компонентів сплаву; n — кількість компонентів сплаву.

На основі цього підходу були розраховані значення теплоємності для сплаву Ti-6Al-4V та Ti-6Al-7Nb. Значення C_p' , отримані за правилом Неймана-Коппа для сплаву Ti-6Al-7Nb, менші за значення C_p для сплаву Ti-6Al-4V, отриманими за тим же правилом в середньому на 3 % у всьому розрахунковому діапазоні температур 300...2800 К. Але якщо порівнювати розрахункові значення теплоємності C_p' , отримані за правилом Неймана-Коппа, і існуючі дані для сплаву Ti-6Al-4V [27], то розбіжність між ними в діапазоні температур від 300 до 1800 К не перевищує 5 %, а з температури 1800 К до температури 2800 К зростає до 17 %, що свідчить про недостатню точність даного підходу за високих температур.

Другий більш точний підхід до вирахування питомої теплоємності сплаву Ti-6Al-7Nb відштовхується від вже відомих значень залежності C_p від температури сплаву Ti-6Al-4V [27]. Оскільки сплави Ti-6Al-4V і Ti-6Al-7Nb відрізняються лише елементами V і Nb та незначною мірою вмістом Ti, то тут варто застосувати підхід адитивного внеску елементів у теплоємність.

Цей підхід ґрунтується на використанні правила сумарних внесків, згідно з яким питома теплоємність багатокомпонентного сплаву може бути виражена через лінійну комбінацію теплоємностей його складових елементів, яку можна описати наступним чином:

$$C_p(T)_{\text{Ti-6Al-7Nb}} = C_p(T)_{\text{Ti-6Al-4V}} + \Delta C_p.$$

Тут ΔC_p — поправка, що враховує різницю у теплоємностях V та Nb. Теплоємність чистих V та Nb доступна із літературних джерел і її можна використовувати для розрахунку внеску заміщених атомів:

$$\Delta C_p = (C_{p,\text{Nb}} - C_{p,\text{V}}) \cdot \Delta \omega,$$

де $\Delta \omega$ — різниця у вмісті заміщених елементів.

В результаті значення розрахункової теплоємності сплаву Ti-6Al-7Nb виявилися меншими від відомих даних для сплаву Ti-6Al-4V в середньому на 3 % у всьому діапазоні температур 300...2800 К. Це говорить про високу точність застосованого підходу. На рис. 3, в побудована відома залежність $C_p(T)$ для сплаву Ti-6Al-4V [27] і розрахункова для сплаву Ti-6Al-7Nb, яка і використана для розрахунків.

Стосовно втрат на випаровування з поверхні розплаву (рис. 3, д). Цих даних в літературі для сплавів Ti-6Al-4V та Ti-6Al-7Nb не виявлено.

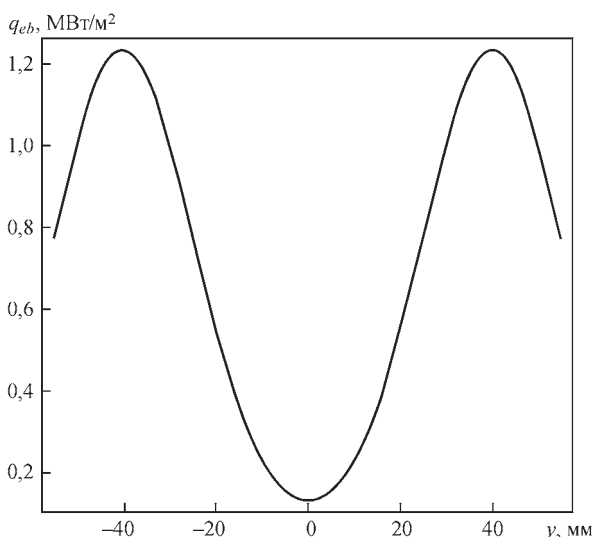


Рис. 4. Розподіл теплової потужності електронного променя q_{eb} по поверхні зливка (вздовж координати y)

Тому доводиться використовувати відомі дані для чистого титану. Це допустимо оскільки легуючі елементи для цих сплавів становлять відповідно 10 і 13 % від питомих мас сплавів.

В роботі [28] надана апроксимаційна формула, яка описує залежність логарифму тиску P , насиченої пари титану від температури T , К:

$$\lg P(T) = -A \cdot T^{-1} + B - C \cdot \lg(T),$$

де коефіцієнти апроксимації для Ti: $A = 22964$; $B = 10,581$; $C = 0,373$.

Тиск насиченої пари дорівнює $P(T) = 10^{\lg P(T)}$.

Використовуючи рівняння Ленгмюра [30] визначена швидкість випаровування титану, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$

$$J_{ev}(T) = P(T) \sqrt{\frac{M_{mol}}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot T}}.$$

Тут M_{mol} — атомна (молярна) маса Ti, $M_{mol} = 0,047867$ $\text{кг}/\text{моль}$; R — універсальна газова стала, $R = 8,31446261815324$ $\text{Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$.

Із відомого значення прихованої молярної теплоти випаровування титану $\Delta H_{ev,mol} = 410$ $\text{кДж}/\text{моль}$ [28] вирахована його прихована теплота випаровування:

$$\Delta H_{ev} = \Delta H_{ev,mol} / M_{mol} = 8565,4 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Питома потужність втрат на випаровування титану в залежності від температури дорівнює

$$q_{ev}(T) = J_{ev}(T) \Delta H_{ev}$$

і представлена на рис. 3, д.

Результати і аналіз математичного моделювання ламінарних гідродинамічних процесів і температурних полів в зливку. Трьохвимірне математичне моделювання здійснювалося для системи ламінарних гідродинамічних процесів і температурних полів в зливку в прохідному кристалізаторі із внутрішнім діаметром 110 мм, висотою 150 мм за масової швидкості витягування зливка (продуктивності плавлення) 20 $\text{кг}/\text{год}$. Заливання попередньо розплавленого металу з проміжної ємності на поверхню ванни відбувається біля стінки кристалізатора в умовно квадратну пляму 10×10 мм (еквівалентний діаметр 11,3 мм). Швидкість заливання металу у ванну і його тиск на її поверхню враховано граничними умовами на границі G_1 (табл. 1). Поверхня ванни рідкого металу підігрівається електронним променем потужністю 16 кВт із ККД 75 %, який переміщується по колу по периферії ванни за Гауссовим розподілом теплової потужності від електронного променя (рис. 4).

По розробленій математичній моделі розраховані температурні поля і гідродинамічні потоки в разі формування зливка титанового сплаву Ti-6Al-7Nb способом ЕПП. При цьому застосовані теплофізичні характеристики металу, які за-

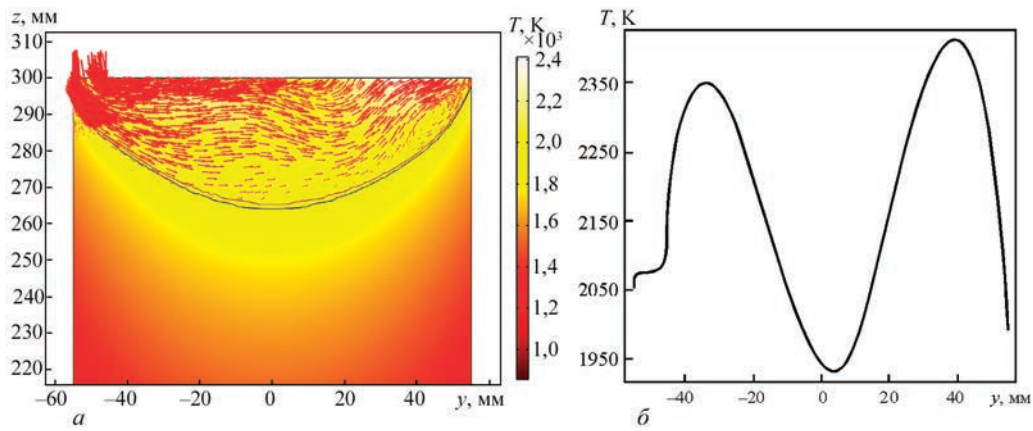


Рис. 5. В перерізі (по координаті y) вздовж вертикальної осі симетрії зливка (координаті z) по середині умовної плями на поверхні ванни від струменя рідкого металу, що заливається у ванну, представлені: a — потоки рідкого металу у ванні; b — температура на поверхні ванни

лежать від температури, та враховані міжфазові перехідні зони. Це дозволило виявити закономірності розподілу гідродинамічних потоків в рідкому металі і температурних полів, а також фронту кристалізації металу під час формування зливка.

На рис. 5, a представлені напрямки векторів швидкості потоків рідкого металу із відрахуванням швидкості витягування зливка до низу в осьовому напрямку. Розглянуто переріз вздовж вертикальної осі симетрії зливка по середині умовної плями на поверхні ванни від струменя рідкого металу, що заливається у ванну. Розмір векторів вибраний в логарифмічному масштабі пропорційним швидкості переміщення розплаву.

На рис. 5, b показано графік розподілу температури на поверхні ванни рідкого металу за Гаусового розподілу настилу теплової потужності від електронного променя по периферії розплаву.

На рис. 6, a представлені напрямки векторів швидкості потоків рідкого металу із відрахуванням швидкості витягування зливка до низу в осьовому напрямку. Розглянуто переріз вздовж

вертикальної осі симетрії зливка під кутом 90° від середини умовної плями на поверхні ванни від струменя рідкого металу, що заливається у ванну. Ця площина перпендикулярна площині, показаній на рис. 5, a . Представлена 1/2 частини рисунку, оскільки інша його половина симетрична.

На рис. 6, b наведений графік розподілу температури на поверхні ванни розплавленого металу.

На рис. 7 показано трьохвимірний розподіл температурного поля і напрямки векторів швидкості потоків металу в кристалізаторі із відрахуванням швидкості витягування зливка до низу.

Потоки рідкого металу (рис. 5, a) розповсюджуються від місця його заливання з одного боку у стінки кристалізатора до протилежного боку стінки, утворюючи біля останньої невеликий вихор. На рисунку показані ізотерми ліквідусу T_L (верхня крива) і солідусу T_S (нижня крива) на границі фронту кристалізації. Положення і геометрія цього фронту (рис. 5, a , рис. 6, a , рис. 7) значною мірою визначають якість формування зливка і концентрацію розподілу легуючих елементів в

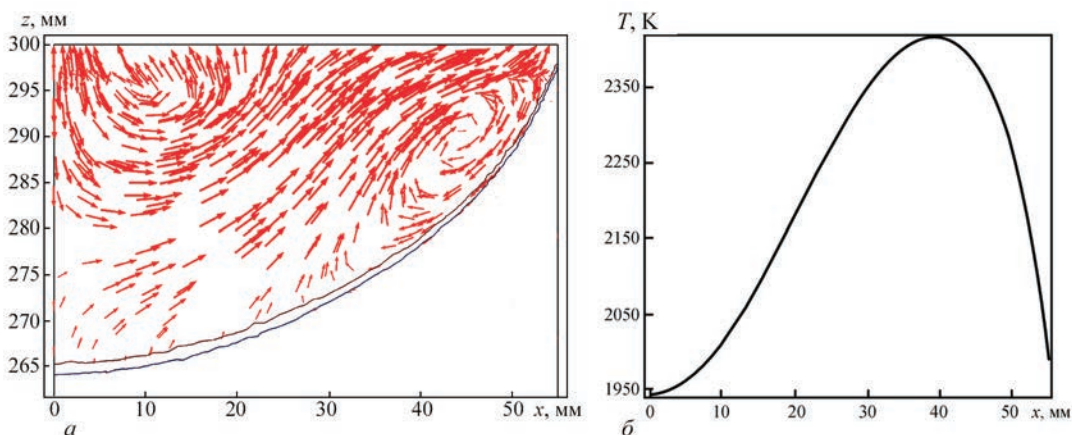


Рис. 6. В перерізі під кутом 90° (по координаті x) вздовж вертикальної осі симетрії зливка (координаті z) представлені: a — потоки рідкого металу у ванні; b — температура на поверхні ванни

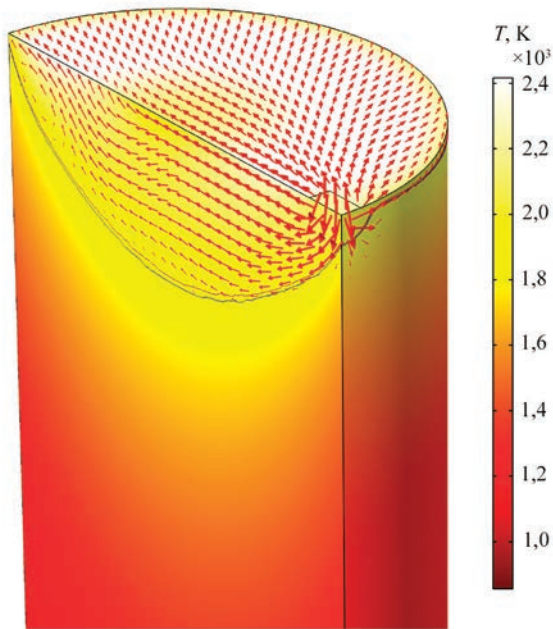


Рис. 7. Трьохвимірний розподіл температурного поля і потоків металу в кристалізаторі із відрахуванням швидкості витягування зливка до низу

його об'ємі. Чим більш плоский фронт, тим більш однорідна структура твердого металу зливка в радіальному напрямку.

Важливим критерієм якості зливків титанових сплавів є гладкий вид їх бічної поверхні. Тому за час плавлення необхідно прагнути того, щоб рідкий метал ванни по можливості як можна менше

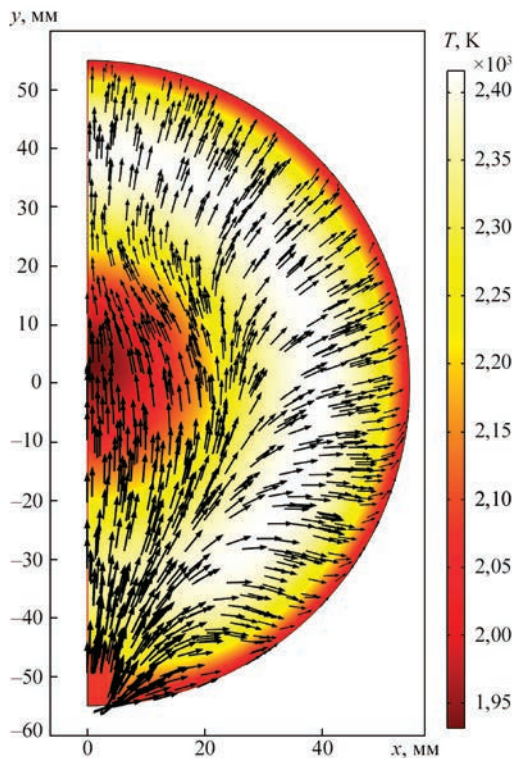


Рис. 8. Розподіл температурного поля і потоків металу в кристалізаторі (вид зверху по координатам x і y)

контактував зі стінкою кристалізатора задля уникнення гофрів на бічних поверхнях зливків.

Правильний вибір місця положення електронного променя в радіальному напрямку на поверхні ванни забезпечує умову того, щоб рідкий метал ванни менше контактував зі стінкою кристалізатора, а інтенсивність променя забезпечувала бажану глибину і геометрію фронту кристалізації. З графіку розподілу температури на поверхні ванни розплавленого металу (рис. 5, б) видно, що максимуми на кривій обумовлені концентраціями теплової потужності, що вноситься променем електронної гармати. Такий розподіл температур забезпечує необхідну форму фронту кристалізації металу на рис. 5, а.

В перерізі зливка на рис. 5, а спостерігається один вихровий потік.

На рис. 8 показано розподіл температурного поля і потоків металу в кристалізаторі (вид зверху), а на рис. 9 — трьохвимірний розподіл потоків розплавленого металу в зливку.

Потоки розплавленого металу для різних вертикальних перерізів зливка на рис. 5, а і 6, а різні, оскільки залежать від місця заливання рідкого металу в кристалізатор. Це видно на трьохвимірному розподілі температурного поля і потоків металу в кристалізаторі (рис. 7 і 8) й потоків розплаву в зливку (рис. 9). На виді зверху (рис. 8) спостерігається виражений діаметральний розподіл потоків металу, який викликано дією потоків від рідкого металу, що заливається в кристалізатор, і тепловою потужністю від електронного променя.

Аналіз отриманих за побудованою математичною моделлю результатів показав, що швидкість руху рідкого металу в кристалізаторі у місці його

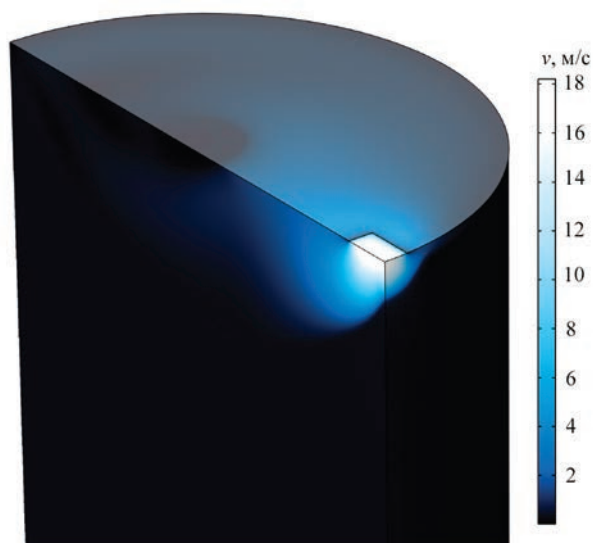


Рис. 9. Трьохвимірний розподіл потоків розплавленого металу в зливку зі шкалою їх швидкості v

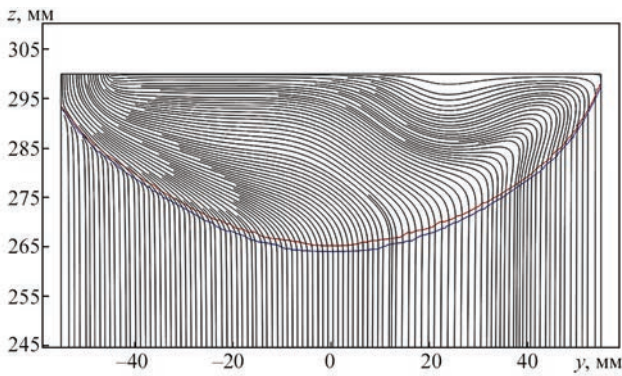


Рис. 10. Напрямки потоків рідкого металу з врахуванням швидкості витягування зливка до низу в осьовому напрямку (по координаті z) в перерізі (по координаті y) вздовж його вертикальної осі симетрії

заливання знаходиться на рівні $18 \cdot 10^{-3}$ м/с, а швидкість окружного потоку ближче до центра кристалізатора на поверхні ванни $\sim 2 \cdot 10^{-3}$ м/с (рис. 9), що відповідає числам критерію Рейнольдса $Re \approx 260$ і 125, величина яких характеризує ламінарний рух потоків розплаву у ванні.

На рис. 10 показані напрямки потоків рідкого металу з врахуванням швидкості витягування зливка до низу в осьовому напрямку. Розглянуто переріз вздовж його вертикальної осі симетрії по середині умовної плями на поверхні ванни від струменя рідкого металу, що заливається у ванну.

Результати розрахунків траєкторій руху металу засвідчили адекватне використання функції Дарсі для пригнічення руху металу в твердій фазі.

Аналіз результатів математичного моделювання впливу технологічних параметрів ЕПП на ламінарні гідродинамічні процеси і температурні поля в зливку. Математичне моделювання здійсню-

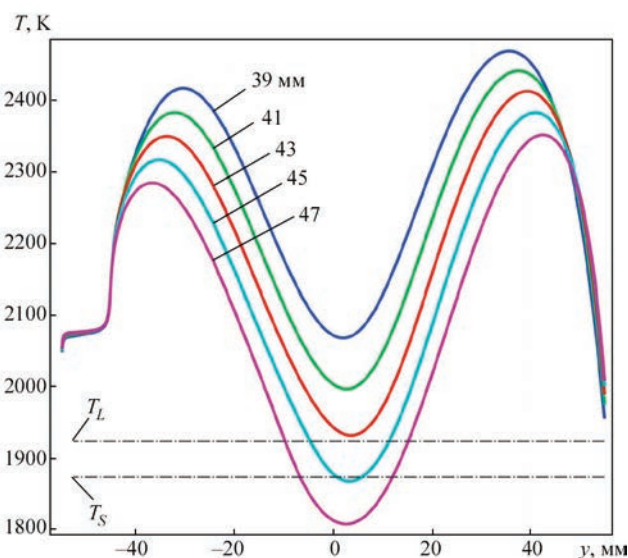


Рис. 11. Температура на поверхні ванни розплаву в разі різного положення центра електронного променя відносно вертикальної осі симетрії зливка (по координаті z) на відстані (по координаті y) 39, 41, 43 (робочий режим), 45 і 47 мм

валося для різного положення центра електронного променя відносно вертикальної осі симетрії зливка й різної швидкості його витягування.

Задля визначення дії на ванну розплаву місця положення електронного променя, що рухається в азимутальному напрямку по поверхні зливка, на рис. 11 надано розподіл температури на поверхні ванни в разі різного положення центра електронного променя відносно вертикальної осі симетрії зливка на відстані 39, 41, 43 (робочий режим), 45 і 47 мм. На рис. 12 представлено розподіл температури та профілів кристалізації металу і двофазних зон у випадку положення електронного променя відносно вертикальної осі симетрії зливка: *a* —

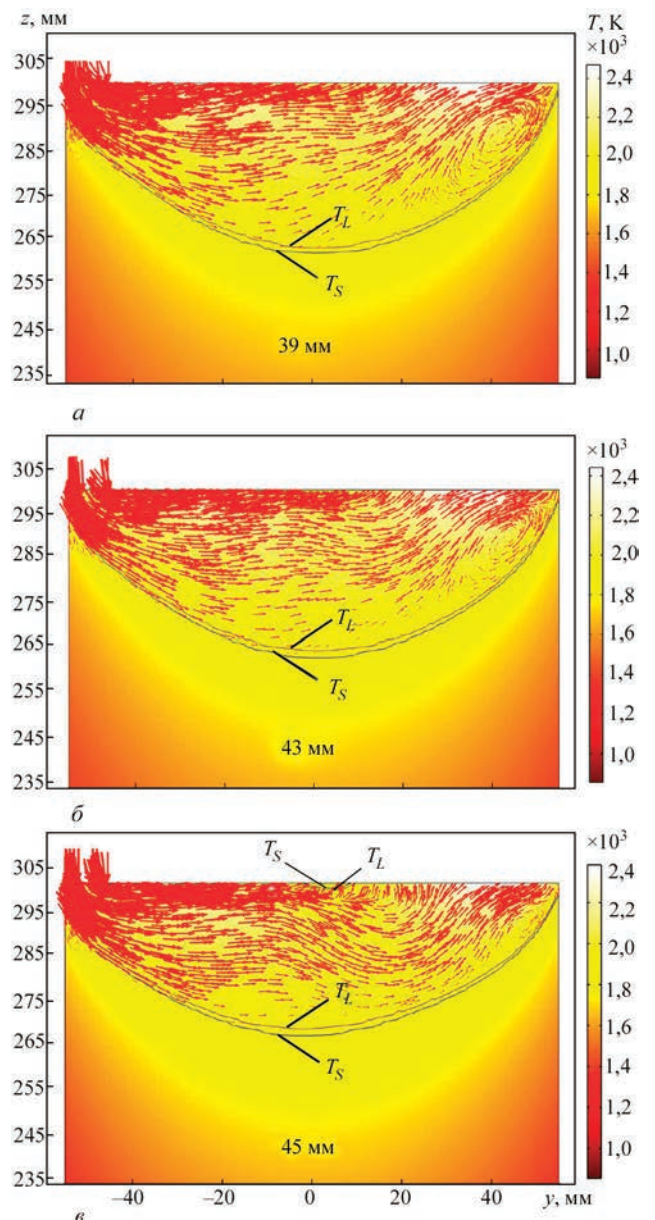


Рис. 12. Розподіл температури та профілів кристалізації металу і двофазних зон (по координаті y) в разі різного положення електронного променя відносно вертикальної осі симетрії зливка по координаті z : *a* — на відстані 39; *б* — 43 (робочий режим); *в* — 45 мм

на відстані 39 мм; б — 43 (робочий режим); в — 45. Видно, що місце положення променя суттєво впливає на геометрію ванни. Чим ближче до центру обертається промінь (39 мм), тим вища температура на поверхні розплаву (рис. 11) і тим глибша стає ванна (рис. 12, а). В разі переміщення променя від центра кристалізатора (43 мм — робочий режим), температура на поверхні розплаву знижується і в нижній частині кривої (рис. 11) досягає температури ліквідуса T_L розплаву, що є оптимальним, і ванна зменшує свою глибину (рис. 12, б). Профіль кристалізації в цьому випадку стає більш плоским, чого і необхідно прагнути. Коли центр променя зміщується на відстань 45 мм від верти-

кальної осі симетрії кристалізатора, температура в нижній частині кривої стає меншою температури солідуса T_S (рис. 11) і на поверхні ванни з'являється острів застиглого металу (рис. 12, в), а ванна зменшує свою глибину. Але це неприйнятний режим із-за появи на поверхні ванни нерозплавленого металу. В разі переміщення центра променя на відстань 47 мм температура на поверхні ванни стає ще меншою (рис. 11), а частка нерозплавленого металу збільшується.

Значимою причиною зниження температури на поверхні розплаву в разі переміщення центра електронного променя від вертикальної осі симетрії кристалізатора в бік його стінки є те, що зна-

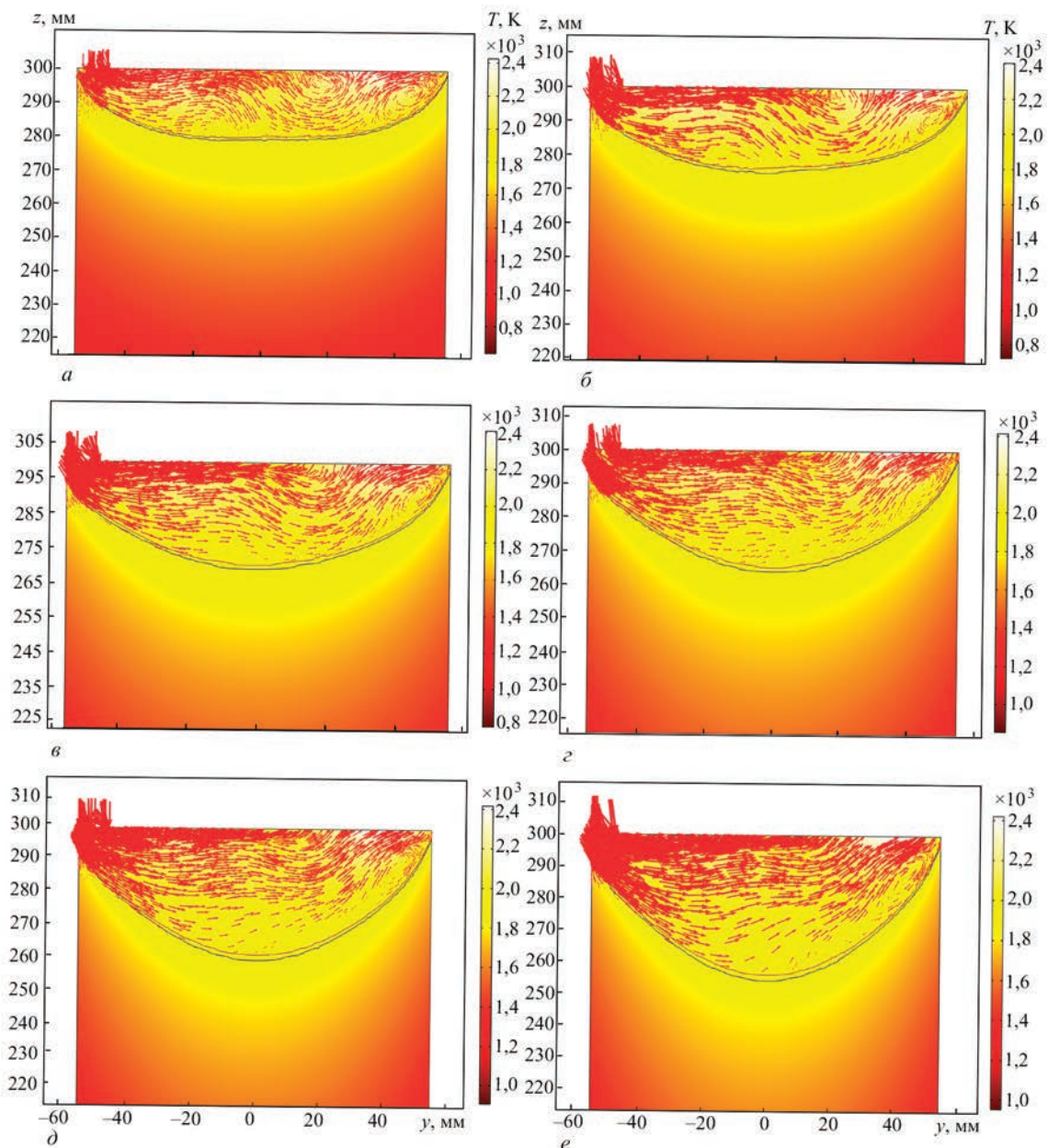


Рис. 13. Розподіл температурного поля, потоків рідкого металу та профілів його кристалізації і двофазних зон (по координатам y і z) в разі різних масових швидкостей витягування зливка (по координаті z), кг/год: а — 5; б — 10; в — 15; г — 20 (робочий режим); д — 25; е — 30

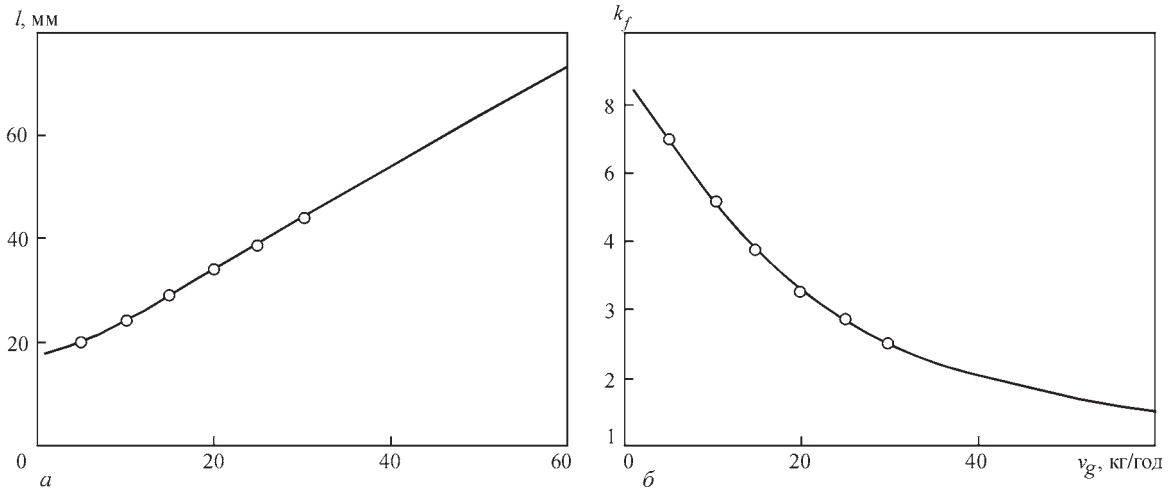


Рис. 14. Інтерполяційні залежності від масової швидкості витягування зливка v_g : *a* — глибини ванни рідкого металу l ; *б* — коефіцієнта форми ванни рідкого металу k_f

чна частина променя потрапляє на верхній торець стінки кристалізатора, а не на поверхню розплаву. Таким чином зменшується корисна потужність нагрівання розплаву.

На рис. 13 показано, як змінюється розподіл температурного поля, потоки рідкого металу, профілі його кристалізації і двофазні зони в разі різних швидкостей заливання розплаву в кристалізатор, а відповідно, і різних швидкостей витягування зливка. Видно, що із збільшенням швидкості заливання розплаву суттєво збільшується глибина ванни, а її профіль стає більш увігнутий.

Більш плоский фронт кристалізації металу зливка, до якого необхідно прагнути, утворюється за менших швидкостей заливання розплаву в кристалізатор, а відповідно, і менших швидкостей витягування зливка.

На рис. 14, *a* і *б* представлені інтерполяційні залежності відповідно глибини ванни рідкого металу l і коефіцієнта форми ванни рідкого металу k_f , який дорівнює відношенню діаметра кристалізатора $d_{кр}$ до глибини ванни l , $k_f = d_{кр}/l$, від масової швидкості витягування зливка v_g , які проходять через шість розрахункових точок, що відповідають глибинам ванн на рис. 13.

Зі збільшенням масової швидкості витягування зливка вище 10 кг/год глибина ванни збільшується за лінійним законом, а коефіцієнт k_f зменшується.

В разі масової швидкості плавлення 20 кг/год та потужності електронно-променевого нагрівання в кристалізаторі 16 кВт формується фронт кристалізації близький до плоского, а коефіцієнт форми ванни дорівнює 3,24, тобто глибина ванни розплаву в 3,24 рази менше за її ширину.

На рис. 15 показано розподіл температури на поверхні ванни розплаву в разі різних масових швидкостей витягування зливка: 5, 10, 15, 20 (ро-

бочий режим), 25 і 30 кг/год. Для масових швидкостей витягування зливка 10...30 кг/год положення центра електронного променя відносно вертикальної осі симетрії зливка було на однаковій відстані 43 мм, що відповідає робочому режиму. Для масової швидкості 5 кг/год ця відстань була взята меншою — 41 мм задля забезпечення повного розплавлення металу на поверхні ванни, оскільки на відстані 43 мм в цьому режимі по центру поверхні ванни утворюється острів із застиглим металом, що не допустимо. Зменшення даної відстані до 41 мм призвело до підвищення температури на поверхні ванни, а відповідно і до підняття кривої розподілу температур (рис. 15) для масової швидкості 5 кг/год. Це стало причиною появи нелінійної ділянки на графіках (рис. 14, *a*) для масової швидкості менше 10 кг/год.

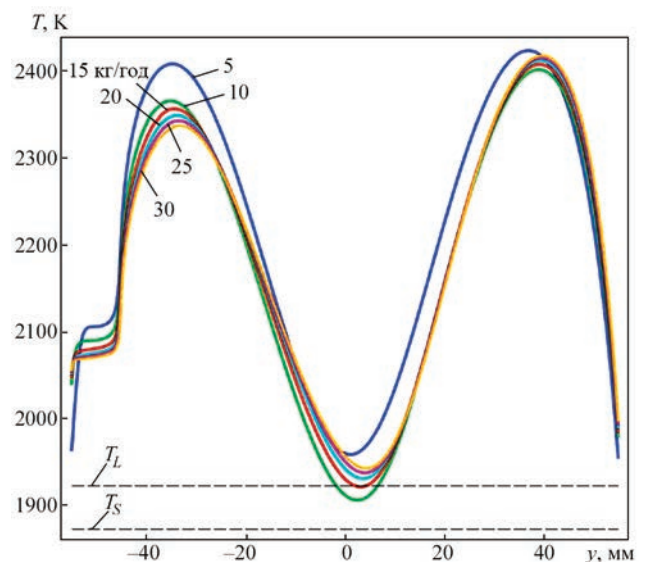


Рис. 15. Розподіл температури на поверхні ванни розплаву (по координаті y) в разі різних масових швидкостей витягування зливка, кг/год: 5, 10, 15, 20 (робочий режим), 25 і 30

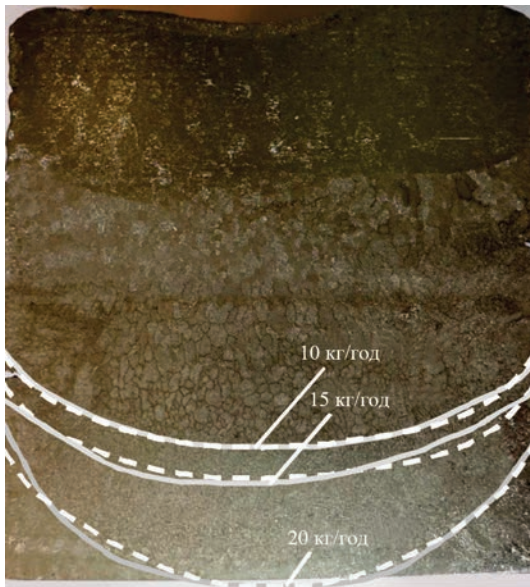


Рис. 16. Макрошліф темплета верхньої частини зливка, розрізаного в аксіальній площині і позначеними на ньому контурами фронтів кристалізації зливка: суцільні лінії — реальні контури; перервні лінії — розрахункові контури

З метою оцінки адекватності побудованої математичної моделі було виплавлено зливки діаметром 110 мм із дослідного складнолегованого титанового сплаву, близького за фізичними властивостями до сплаву Ti-6Al-7Nb, в якому явно відображаються профілі кристалізації металу. Від верхньої частини цього зливка вирізали повздовжній темплет та шляхом травлення виявили його макроструктуру. Велика кількість легуючих елементів в дослідному сплаві дозволила досить чітко виявити профілі кристалізації в разі різних швидкостей плавлення. На рис. 16 наведено макрошліф темплета верхньої частини зливка, розрізаного в аксіальній площині і позначеними на ньому контурами фронтів кристалізації зливка: суцільні лінії — реальні контури; перервні лінії — розрахункові контури. На цьому рисунку нижній, позначений світлою суцільною лінією профіль кристалізації відповідає робочій масовій швидкості витягування зливка 20 кг/год.

На завершальній стадії плавлення зливка швидкість плавлення зменшується. На рис. 16 світлими суцільними лініями позначені ще два профілі кристалізації, які відповідають масовій швидкості витягування зливка на рівні 15 і 10 кг/год. На цей рисунок нанесені й розрахункові світлі перервні лінії профілів кристалізації для масових швидкостей 10 кг/год з рис. 13, б; 15 з рис. 13, в; 20 з рис. 13, г. Порівняння реальних контурів фронтів кристалізації зливка, позначених суцільними лініями, і розрахункових контурів фронтів кристалізації, нанесених на рисунок світлими перервними лініями, свідчить про хороше збігання профілів

фронтів і прийнятну точність результатів математичного моделювання для ламінарного характеру руху потоків розплаву.

Макрошліф нижньої робочої області зливка (рис. 16) характеризується відсутністю раковин та несучільностей, а макроструктура зливка має кристали, близькі до рівновісних, що є показником високої якості зливка. Верхня частина зливка, утворена на завершальній стадії плавлення і виведення усадкової раковини, характеризується крупними нерівновісними кристалами, має інший склад легуючих елементів у зв'язку з їх випаровуванням та не вважається такою, що забезпечує прийнятну якість металу. Тому вона відрізається і переплавляється під час наступних плавлень зливків.

Таким чином, для ЕПП титанових сплавів в кристалізатор діаметром 110 мм, в результаті порівняння розрахункового профілю фронту кристалізації металу в зливку з фактичним профілем кристалізації виплавленого зливка встановлено, що ламінарне представлення течії гідродинамічних потоків рідкого металу в зливку дає більш наближений результат до реального профілю, чим їх турбулентне представлення із роботи [12].

Аналіз отриманих результатів показав, що теплопередача в рідкій фазі зливка в ламінарному режимі в основному обумовлена тепломасообміном за рахунок руху розплавленого металу, а потужність електронного променя і вид його настилу на поверхні ванни дуже суттєво впливає на глибину і коефіцієнт форми ванни розплаву в кристалізаторі.

За розрахованими режимами в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України виплавлено високоякісні зливки діаметром 110 мм титанового сплаву медичного призначення Ti-6Al-7Nb з практично однорідною структурою металу [30].

До факторів, які впливали на точність розрахунків, відносяться використані в ході розробки математичної моделі спрощення і припущення, які кардинально не вплинули на виявлені загальні тенденції формування зливка під час ЕПП. Подальші дослідження повинні стосуватися удосконалення математичної моделі із меншою кількістю спрощень і припущень.

Математичне моделювання дозволило усунути із підготовки до ведення технологічного процесу дуже затратний метод проб для визначення технологічних режимів і є корисним і актуальним для інженерів-ливарників.

Висновки

1. Розроблена тривимірною математична модель теплових і стаціонарних ламінарних гідродина-

мічних процесів на основі рівнянь Нав'є–Стокса в розплаві зливка циліндричної форми. Зливка виплавляється способом електронно-променевого плавлення, в якому промінь переміщується по колу периферії ванни розплаву за Гауссовим розподілом теплової потужності від променя.

2. За результатами математичного моделювання отримані температурні поля і ламінарні гідродинамічні потоки розплавленого металу в зливку титанового сплаву Ti–6Al–7Nb діаметром 110 мм. Визначено геометрію двофазної зони ліквідус–солідус, яка визначає фронт кристалізації металу. В разі потужності електронно-променевого нагрівання 16 кВт та масової швидкості плавлення 20 кг/год формується такий фронт кристалізації, що забезпечує практично однорідну структуру металу зливка.

3. Для розглянутої системи процесу ЕПП титанового сплаву Ti–6Al–7Nb в результаті порівняння розрахункового профілю кристалізації металу в зливку діаметром 110 мм з профілем кристалізації виплавленого зливка доведено, що ламінарне представлення течії гідродинамічних потоків рідкого металу в зливку дає більш наближений результат до реального профілю, чим їх турбулентне представлення.

4. На підставі розрахункових даних виявлено, що теплопередача в рідкій фазі зливка в основному обумовлена тепломасообміном за рахунок руху розплавленого металу, а розподіл потужності електронного променя на поверхні ванни дуже суттєво впливає на тепломасообмін і на глибину ванни розплаву.

5. Встановлено, що більш плаский фронт кристалізації металу зливка, до якого необхідно прагнути, утворюється за менших швидкостей заливання розплаву в кристалізатор і відповідно менших швидкостей витягування зливка.

Список літератури/References

1. Tamayo José, A., Riascos Mateo, Vargas Carlos, A., Baena Libia, M. (2021) Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy via electron beam melting for the development of implants for the biomedical industry. *Heliyon*, **7**, 1–26. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06892>
2. Mahlobo Mandlenkosi, G.R., Chikocha Lethu, Olubambi Peter, A. (2022) Study of the corrosion properties of powder rolled Ti–6Al–4V alloy applied in the biomedical implants. *J. of Materials Research and Technology*, **18**, 3631–3639. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.04.004>
3. Mamoun Fellah, Mohamed Labaiz, Omar Assala et al. (2014) Tribological behavior of Ti–6Al–4V and Ti–6Al–7Nb alloys for total hip prosthesis. *Advances in Tribology*, **July**, 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/451387>
4. Bartha, Kristina, Zháňal, Pavel, Stráský, Josef et al. (2019) Lattice defects in severely deformed biomedical Ti–6Al–7Nb alloy and thermal stability of its ultra-fine grained microstructure. *J. of Alloys and Compounds*, **788**, 881–890. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.02.173>
5. Bolzoni, L., Ruiz-Navas, E.M., Gordo, E. (2017) Evaluation of the mechanical properties of powder metallurgy Ti–6Al–7Nb alloy. *J. of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, **67**, 110–116. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2016.12.005>
6. Sun, Y., Huang, B., Puleo, D.A. et al. (2016) Improved surface integrity from cryogenic machining of Ti–6Al–7Nb alloy for biomedical applications. *Procedia CIRP*, **45**, 63–66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.362>
7. Wei Guijiang, Tan Meiyang, Attarilar Shokouh et al. (2023) An overview of surface modification, a way toward fabrication of nascent biomedical Ti–6Al–4V alloys. *J. of Materials Research and Technology*, **24**, 5896–5921. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.046>
8. Oktikawati, A., Riastuti, R., Damisih, D. et al. (2024) Electrochemical characteristic and microstructure of Ti–6Al–7Nb alloy by centrifugal casting for orthopedic implant based on ageing time variations. *Eastern-European J. of Enterprise Technologies*, **2(12)**, 6–15. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.302614>
9. Hussain Syed Altaf, Manoj Panchal, Viswanath Allamraju K. et al. (2023) Optimization of wear behavior of heat-treated Ti–6Al–7Nb biomedical alloy by response surface methodology. *Environmental Research*, **231**, Pt 2, 116193. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116193>
10. Biswal, Smrutiranjana, Tripathy, S., Tripathy, D.K. (2024) Optimisation of PMEDM process parameters for Ti–6Al–7Nb biomedical material. *Materials Today: Proceedings*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2024.02.044>
11. Cabrini, M., Carrozza, A., Lorenzi, S. et al. (2022) Influence of surface finishing and heat treatments on the corrosion resistance of LPBF-produced Ti–6Al–4V alloy for biomedical applications. *J. of Materials Processing Technology*, **308**, 117730. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117730>
12. Krivtsun, I., Rymar, S., Hubatiuk, R. et al. (2024) Construction of a mathematical model of turbulent heat and mass transfer processes for the case of electron beam melting of titanium alloy casts. *Eastern-European J. of Enterprise Technologies, Engineering Technological Systems*, **5(1)**, 110–126. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.312561>
13. Rubineti, D., Weiss, D.A., Chaudhuri, A., Kraniotis, D. (2018) Modeling approach to facilitate thermal energy management in buildings with phase change materials. In: *Proc. of Conf. on Comsol 2018, Lausanne, Switzerland*, **7**. <https://www.comsol.com/paper/modeling-approach-to-facilitate-thermal-energy-management-with-phase-change-mate-63481>
14. Akhonin, S., Pikulin, O., Berezos, V. et al. (2022) Determining the structure and properties of heat-resistant titanium alloys VT3-1 and VT9 obtained by electron-beam melting. *Eastern-European J. of Enterprise Technologies*, **5(12)**, 6–12. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265014>
15. Akhonin, S.V., Pikulin, O.M. (2019) Investigation of effect of electron beam surface treatment of titanium alloy ingots on structure and properties of melted metal. In: *Proc. of IOP Conf. on Series: Materials Science and Engineering*, **582 (1)**, 012047. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/582/1/012047>
16. Berezos, V.O., Akhonin, D.S. (2023) Electron beam melting of titanium alloys for medical purposes. *The Paton Welding J.*, **6**, 41–48. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.06.06>
17. Akhonin, S.V., Berezos, V.O., Bondar, O.I. et al. (2021). Mathematical modeling of hydrodynamic and thermal processes during the crystallization of titanium ingots EBM.

- Suchasna Elektrometalurhiya*, **1**, 27–34 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2021.01.03>
18. Akhonin, S.V., Gorislavets, Yu.M., Gluhenkyi, A.I. et al. (2019) Modeling of hydrodynamic and thermal processes in a crystallizer during electron beam melting with an intermediate capacity. *Suchasna Elektrometalurhiya*, **4**, 9–17 [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/sem2019.04.02>
 19. Akhonin, S.V., Krivtsun, I.V., Berezos, V.O. et al. (2024) Mathematical modeling of heat and mass transfer processes of electron beam melting of ingots from high-strength titanium alloys. In: *Proc. of VII Inter. Conf. on Welding and Related Technologies, 7–10 October 2024, Yaremche, Ukraine*. Kyiv, 119–124, Kyiv, International Association «Welding». DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003518518-25>
 20. Ben-David, O., Levy, A., Mikhailovich, B., Azulay, A. (2013) 3D numerical and experimental study of gallium melting in a rectangular container. *Inter. J. of Heat Mass Transfer*, **67**, 260–271. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.07.058>
 21. Heat Transfer Module User's Guide. Version: Comsol 5.4. <http://www.comsol.com>
 22. Versteeg, H.K., Malalasekera, W. (2007) *An introduction to computational fluid dynamics. The finite volume method*. Harlow, Pearson Prentice Hall.
 23. Avnaim, M.H., Levy, A., Mikhailovich, B. et al. (2016) Comparison of three-dimensional multidomain and single-domain models for the horizontal solidification problem. *J. of Heat Transfer*, **138**(11), 112301–1–112301-11. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4033700>
 24. Truong Van-Doi, Yong-Taek Hyun, Jong Woo Won et al. (2022) Numerical simulation of the effects of scanning strategies on the aluminum evaporation of titanium alloy in the electron beam cold hearth melting process. *Materials*, **15**. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15030820>
 25. Yao Lu, Maijer Daan M., Cockcroft Steve L. et al. (2018) Quantification of heat transfer phenomena within the melt pool during the plasma arc re-melting of titanium alloys. *Inter. J. of Heat and Mass Transfer*, **126**, 1123–1133. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.06.051>
 26. Belyaev, N.M. (1989) *Fundamentals of Heat Transfer*. Kyiv, Vyshcha Shkola [in Russian].
 27. Mills, K. (2002) *Recommended values of thermophysical properties for selected commercial alloys*. Woodhead publishing Limited.
 28. Efimov, A.I., Belorukova, L.P., Vasilkova, I.V., Chechev, V.P. (1983) *Properties of inorganic compounds. Directory*. Leningrad, Khimiya.
 29. Langmuir, I. (1913) The vapor pressure of metallic tungsten. *Physical Review*, **2**(5), 329–342. DOI: <https://doi.org/10.1103/physrev.2.329>
 30. Berezos, V.O., Akhonin, D.S. (2023) Electron beam melting of titanium alloys for medical purposes. *The Paton Welding J.*, **6**, 41–48. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.06.06>

MATHEMATICAL MODELING OF HEAT AND MASS EXCHANGE PROCESSES DURING ELECTRON BEAM MELTING OF INGOTS OF TITANIUM ALLOY Ti–6Al–Nb

I.V. Krivtsun, S.V. Rymar, R.S. Gubatyuk, V.O. Berezos, D.S. Akhonin, R.V. Selin
E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: elmag@paton.kiev.ua

The results of mathematical modeling of temperature fields and hydrodynamic laminar flows of liquid metal during electron beam melting of titanium alloy ingots are presented. The calculations were performed using the developed three-dimensional mathematical model based on the finite element method taking into account a number of simplifications and assumptions. The model allows us to determine the regularities of thermal and hydrodynamic processes occurring in a continuous water-cooled mould during ingot melting, and the geometry of the liquidus-solidus interphase transition zone, and accordingly, of the metal crystallization front, which significantly affects the quality of the metal during ingot formation. We calculated the parameters of the melting process for ingots of a small diameter of 110 mm from medical titanium alloy Ti–6Al–7Nb with such a crystallization front, for which the production of high-quality metal with a homogeneous structure and a homogeneous distribution of alloying elements in the ingot volume is ensured. It was found that the heat and mass transfer in the liquid metal is significantly affected by the power of the electron beam and its distribution over the pool surface, and the heat transfer is mainly due to the movement of the melt. 30 Ref., 16 Fig.

Keywords: electron beam melting, titanium alloys, mathematical modeling, heat and mass transfer, metal crystallization front

Отримано 24.06.2025

Отримано у переглянутому вигляді 26.06.2025

Прийнято 31.07.2025

СУЧАСНА ЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЯ



ПІДПИШІТЬСЯ СЬОГОДНІ

Передплата доступна у друкованому та цифровому форматах!

Тел.: (38044) 205-23-90; E-mail: journal@paton.kiev.ua; patonpublishinghouse@gmail.com;

<https://patonpublishinghouse.com>

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ УЛЬТРАЗВУКУ ПРИ ОТРИМАННІ ДИСПЕРСНИХ ГРАНУЛ ГАЗОВИМ І ПЛАЗМОВО-ДУГОВИМ РОЗПИЛЕННЯМ МЕТАЛЕВИХ РОЗПЛАВІВ ТА КОМПАКТНИХ МАТЕРІАЛІВ (Огляд)

В.М. Коржик, О.С. Терещенко, Д.В. Строгонов, О.І. Дем'янов, О.В. Ганущак

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: vnkorzhykn@gmail.com

Розглянуто технологічні особливості використання ультразвукових коливань для диспергування мікрооб'єктів металевих розплавів в таких технологіях виробництва дисперсних сферичних порошків, як: газове розпилення, ультразвукове розпилення на хвилеводі, розпилення плазмовою дугою за рахунок стоячої хвилі, розпилення електричною дугою з прикладанням ультразвуку до розпилюваного дроту, розпилення плазмовою дугою з прикладанням ультразвукових коливань до розпилюваної заготовки. Проаналізовано вплив ультразвукових коливань на процес формування та відрив краплі розплаву для згаданих методів. Встановлено, що накладання ультразвуку сприяє зменшенню розміру початкових крапель розплаву, інтенсифікує диспергування за рахунок створення додаткового тиску на краплини розплаву, та, як результат, сприяє звуженню розподілу гранулометричного складу. З'ясовано, що серед проаналізованих підходів до отримання сферичних порошків з використанням високочастотних акустичних коливань найбільш перспективною є технологія плазмово-дугового розпилення дротів та прутків за умови накладання ультразвуку безпосередньо на заготовку. Проведено аналіз ефективності та перспектив використання плазмово-дугових технологій розпилення з введенням ультразвукових коливань у розпилювані заготовки і зроблено припущення, що даний підхід дозволить збільшити вихід порошків фракції –63 мкм до 80...90 %, що є перспективним для застосування у виробництві порошків для адитивних технологій. Бібліогр. 45, рис. 6.

Ключові слова: ультразвукове розпилення, диспергування, плазмово-дугове розпилення, газове розпилення, сферичні порошки, гранулометричний склад

Вступ. Вплив акустичних коливань в ультразвуковому діапазоні широко застосовується в техніці та промисловості для вирішення завдань з неруйнівного контролю (дефектоскопія, визначення товщин покриттів, медичні дослідження), для екологічної очистки матеріалів у спеціальних ваннах з метою знежирення або галтування для активації поверхні перед нанесенням покриттів, для пайки та зварювання металів і пластиків, для розпилення рідин в аналітичному обладнанні та металевих розплавів (диспергування) у виробництві порошків, у металообробці для зниження коефіцієнта тертя та при фінішній обробці отворів після свердління та фрезерування [1]. Крім того, застосування ультразвуку в промислових технологіях включає ударну обробку зварних швів для релаксації внутрішніх напружень та нагартування поверхні, ультразвукове волочіння дроту зі зворотно-поступальним коливальним рухом волоки, гомогенізацію розчинів і формування суспензій та емульсій [2]. Особливою важливою особливістю ультразвукових коливань є інтенсифікація руху середовища, в якому вони розповсюджуються, що може бути засто-

сованим для підвищення ефективності існуючих технологій, особливо це стосується зварювальних та споріднених процесів [3].

Відомо, що у технологіях електродугового зварювання прикладання ультразвукових коливань до самих деталей, до розплавленого металу або ж до витратного електрода призводить до активного перемішування зварювальної ванни за рахунок механічних коливань, підвищення теплопровідності частинок у дузі при збільшенні коефіцієнта термічної дифузії та збільшення тиску, що створює електрична дуга [4–6]. Сама дуга під дією коливань звужується зі збільшенням щільності її енергії, що підвищує вкладення тепла в частинки металу [7]. Крім того, за рахунок високочастотних коливань іонізовані частинки знаходяться в дузі довше після проходження резонансної частоти [8]. Використання ультразвуку в технології напівавто-матичного зварювання плавким електродом демонструє більш активний перенос частинок розплаву з торця дроту: швидкість польоту крапель зростає на 10...20 % при збільшенні частоти відриву крапель у 3 рази за рахунок резонування плівки розплаву

В.М. Коржик — <http://orcid.org/0000-0001-9106-8593>, О.С. Терещенко — <http://orcid.org/0009-0003-4021-0758>,
Д.В. Строгонов — <http://orcid.org/0000-0003-4194-764X>, О.І. Дем'янов — <https://orcid.org/0000-0001-7184-3839>,
О.В. Ганущак — <https://orcid.org/0000-0003-4392-6682>

на торці дроту і флуктуаціями його поверхні та, крім того, надаючи краплинам, що утворюються на поверхні розплаву, додаткового прискорення, що призводить до зниження зусилля необхідного для відриву та, відповідно, до інтенсифікації процесів масопереносу в електричній дузі [7–14].

Зважаючи на згаданий вище вплив ультразвукових коливань, використання даних ефектів може бути перспективним в такому застосуванні, як розпилення порошків для адитивних технологій виробництва (AM — Additive Manufacturing), що вимагають сферичних частинок вузьких класів. Наразі проблема отримання порошків класу –63 мкм з високим коефіцієнтом сферичності не вирішена в повній мірі технологічним втіленням. Найбільш перспективними технологіями отримання дрібних сферичних частинок з високими коефіцієнтами сферичності та чистотою і відтворваністю хімічного складу є плазмові (РА — Plasma Atomization) [15, 16]. Виходячи з того, що традиційно технології РА використовують дроти як вихідні матеріали для розпилення, накладання на них ультразвукових коливань, за рахунок впливу на електричну дугу та розплав, потенційно може бути використане для збільшення виходу дрібнодисперсної фракції класу –100 мкм, підвищення продуктивності процесу розпилення та підвищення коефіцієнта сферичності отриманих порошків.

Відповідно, метою даної роботи є встановлення впливу ультразвукових коливань при отриманні порошків газовим і плазмово-дуговим розпиленням металевих розплавів та компактних матеріалів на дисперсність та гранулометричний склад отриманих порошків.

У зв'язку з тим, що даний аспект застосування височастотних акустичних коливань у технологіях розпилення розплавів потребує детального дослідження, дана робота направлена на вирішення таких задач: проведення критичного огляду існуючих технологій диспергації мікрооб'ємів металевого розплаву з використанням ультразвуку; оцінка перспектив і проведення аналізу ефективності використання ультразвуку при плазмово-дуговому розпиленні дрових та пруткових матеріалів та перспектив використання такого підходу.

Використання ультразвукових коливань в процесах диспергації мікрооб'ємів металевого розплаву. Ультразвукові генератори широко використовують для диспергування (розпилення) рідин і отримання аерозолів у медичних застосуваннях та в аналітичній техніці для проведення досліджень хімічного складу рідин або розчинених

твердих речовин методами емісійної спектроскопії. На відміну від інших методів диспергування ультразвукове розпилення не пов'язане з формуванням високошвидкісних потоків за рахунок розбиття крапель газовими струменями та вимагає більш ніж в 100 раз менше потужності для отримання крапель необхідного діаметра. Основними механізмами розпилення тут є кавітація та резонанс. Причому, основною змінною, що визначає розмір отриманих крапель є частота коливань, яка, в свою чергу, задає амплітуду коливань [17–20].

Авторами роботи [21], що вивчали вплив елементів коливального контуру на середній розмір розпиленних частинок, була підтверджена на практиці дана гіпотеза та отримана емпірична формула (1), з якої випливає, що параметрами, які впливають на середній розмір розпиленних частинок є поверхневий натяг рідини σ , густина ρ та частота коливань f , яка є основною змінною процесу:

$$D_{\text{сеп}} = 0,73 \left(\frac{\sigma}{\rho f^2} \right)^{1/3}. \quad (1)$$

При цьому авторами [19] встановлено, що для ініціації процесу диспергування розплаву за рахунок збудження стоячих хвиль при резонансній частоті необхідно досягнути певного значення амплітуди коливань. З запропонованої моделі випливає, що мінімальна амплітуда коливань залежить від динамічної в'язкості μ , густини ρ , поверхневого натягу рідини σ та частоти коливань f :

$$A_m = \frac{2\mu}{\rho} \sqrt[3]{\frac{\rho}{\pi\sigma f}}. \quad (2)$$

Окремим застосуванням ультразвуку при розпиленні рідин є розпилювальна сушка (spray drying). Метод являє собою розпилювальну сушку, при якій в реактор, що обдувається гарячим повітрям або нагрітим газом через форсунку, до якої прикладені височастотні коливання, впорскується потік речовини, що являє собою суспензію або розчинену відповідним розчинником речовину. Під час проходження через сопло форсунки потік розбивається за рахунок кавітації на дрібні частинки, розмір яких визначається частотою коливань та характеристиками рідини, після чого розчинник випаровується за рахунок конвекції. Результатом цього є наддрібні частинки вузького гранулометричного складу, що є неможливою задачею для звичайної розпилювальної сушки, проте основними застосуваннями цього методу є харчова промисловість, фармацевтичне виробництво та отримання грануляту порошків для порошкової

металургії. Останнє дозволяє вирішити питання отримання композиційних нанопорошків та значно підвищити технологічність субмікронних порошків, до того ж зменшивши транспортувальні втрати за рахунок унесення [22–25].

З описаних закономірностей можна зробити висновок про те, що розпилення з застосуванням ультразвукових коливань може бути використане не тільки для рідин, а й для металевих розплавів. Відповідно, ультразвукові коливання можуть розглядатися як метод покращення якості, дисперсності та збільшення виходу необхідного продукту в технологіях отримання дисперсних порошків розпиленням.

Газове розпилення металевих розплавів із застосуванням ультразвуку. Розпилення розплаву струменями холодного газу є давно відомою і дуже поширеною технологією виробництва металевих порошків. Система розпилення складається з системи нагрівання тигля, в який завантажено вихідний матеріал, проміжного ковша з спеціальним соплом для розливки, системи подачі газу на зріз цього сопла та камери, в якій відбувається процес. Першим етапом процесу розпилення газу є вилівка розплавленого металу з проміжного ковша через спеціальну форсунку. Далі рідкий метал розбивається струменями інертного газу, що сприяють розділенню розплаву на дрібні краплі та їх охолодженню, яке триває під час падіння крапель в камері у бункер-збірник [26].

Традиційна технологія газового розпилення має суттєві недосконалості: широкий діапазон гранулометричного складу порошку від 25 до 500 мкм, низький коефіцієнт сферичності до 0,7, формування сателітів на поверхні великих частинок та закрита пористість [27]. Для вирішення цих проблем велися роботи з оптимізації процесу газового розпилення з використанням ультразвукових коливань, що прикладаються до трубки розливки розплаву, що вставляється у форсунку, яка слугує хвилеводом для передачі ультразвукових коливань [28–30]. Схема такого процесу наведена на рис. 1.

Вітчизняні дослідники [31] використали підхід з передачею ультразвукових коливань на розплав через диспергуючий газ при використанні проміжного сопла, що працює за типом акустичного випромінювача. Коливання на проміжному соплі виникають за рахунок розсічення потоку газу верхньою кромкою, що сприяє збудженню коливань у газі перед зіткненням з потоком розплаву. Використовуючи штатний інжекційний вузол для газового розпилення з ультразвуковим проміжним

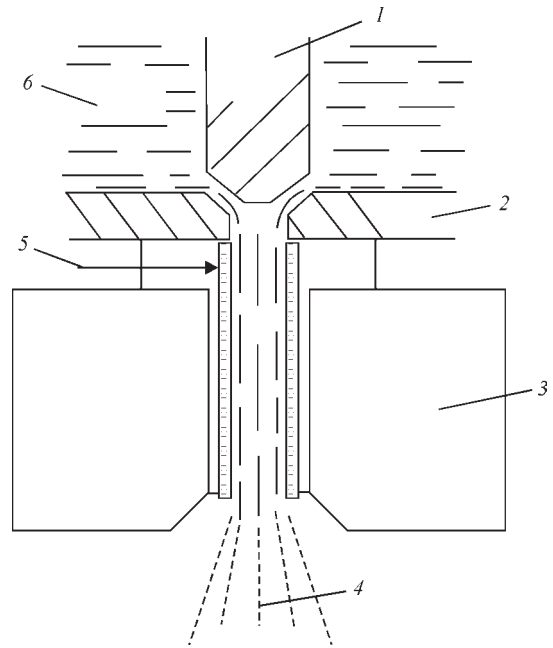


Рис. 1. Ультразвукове газове розпилення [28]: 1 — стопорний стрижень; 2 — тигель; 3 — ультразвукова форсунка; 4 — конус розпилення; 5 — керамічна трубка розливки; 6 — розплав соплом та без нього автори встановили, що при розпиленні сплаву NM79 вихід фракції <math>< 80\text{ мкм}</math> становив не менше 75 % проти 58 % без використання ультразвуку.

Втім промислового впровадження технологія газового розпилення з ультразвуковими коливаннями не знайшла у зв'язку з неможливістю вирішити основні недоліки процесу формування закритої газової пористості та розвинутої поверхні частинок.

Ультразвукове розпилення металевого розплаву на хвилеводі. Одним з найновіших методів до виробництва високоякісних металевих порошків є розпилення розплаву у тиглі, що є частиною ультразвукового коливального контуру.

Так, авторами роботи [32] розроблено технологічний підхід, що дозволяє отримувати сферичні порошки металів і сплавів, використовуючи вихідний матеріал у вигляді кускового матеріалу, причому матеріал розміщується у тиглі індукційної пічки, з якої краплі розплаву, витікаючи через сопло, вільно падають на хвилевід, на який подаються коливання з частотою 20 кГц, а для підтримання рідкого стану матеріалу використовується електрична дуга (рис. 2). Сама камера процесу розпилення заповнюється аргоном, а розбиті капілярними хвилями краплі, що відриваються від розплаву, здуваються потоком аргону та затвердівають. Видалення атмосферних газів перед заповненням аргоном виконується за рахунок вакуумних насосів.

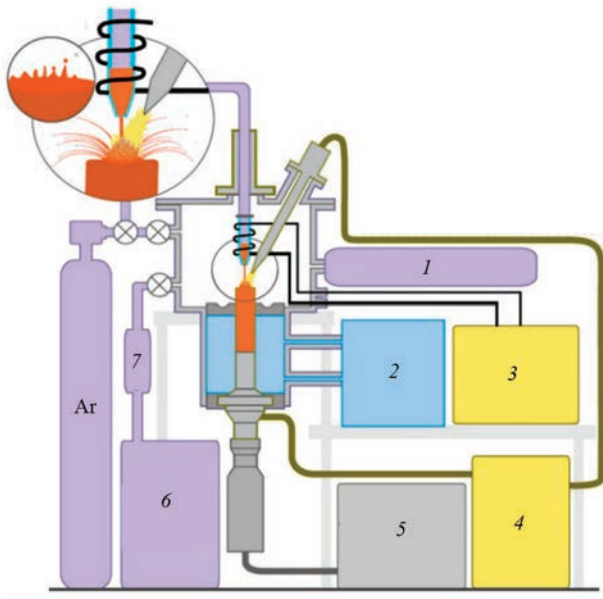


Рис. 2. Схема ультразвукового розпилення розплаву на хвилеводі з додатковим нагрівом електричною дугою [32]: 1 — датчик диску; 2 — водяне охолодження; 3 — височастотний генератор; 4 — система дугового переплаву; 5 — ультразвуковий генератор; 6 — вакуумний насос; 7 — фільтр

Дослідники в роботі [33] показали, що розпилення металевого розплаву залізних сплавів на хвилеводі дозволяє отримати розмір частинок менше 100 мкм, причому вихід фракції 32...45 та 45...63 мкм становить не менше 60 % від загального виходу порошку. У роботі [34] показано, що на титанових сплавах Ti-6Al-4V та Ti25Al12Nb дана технологія дозволяє забезпечити коефіцієнт сферичності частинок 0,9 та підвищити вихід вмісту класу -63 + 20 в порівнянні з газовим розпиленням: так, розпилення газом дає вихід фракції -63 мкм на рівні 30 % від загального об'єму, в той

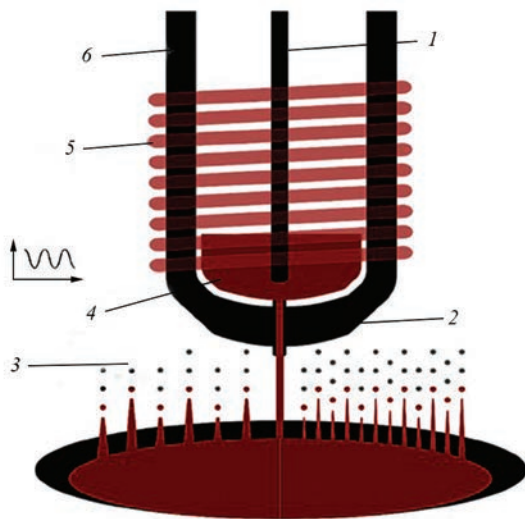


Рис. 3. Схема ультразвукового розпилення розплаву на хвилеводі [35]: 1 — запираючий графітовий стрижень; 2 — графітове сопло; 3 — алюмінієвий порошок; 4 — розплав алюмінію; 5 — індуктор; 6 — графітовий тигель

час як ультразвукове розпилення на хвилеводі має вихід порядку 80...90 % в залежності від частоти коливань.

В ході експериментів дослідники [34] встановили, що для розпилення металевих розплавів на вібруючій з високою частотою поверхні справедливим є рівняння (3), що встановлює залежність середнього розміру частинок від довжини капілярної хвилі λ та емпіричної функції f , що залежить від значення критеріїв Вебера (We), Онезорге (Oh) та інтенсивності (In). Причому в більшості процесів розпилення розплавів значення функції приймають як рівне одиниці ($f(We, Oh, In) = 1,0$):

$$D_{\text{сер}} = 0,34\lambda f(We, Oh, In). \quad (3)$$

Проте для розрахунку довжини капілярної хвилі автори роботи [34] пропонують використовувати емпіричну залежність (4), що включає поверхневий натяг σ та густину ρ розплаву при заданій температурі, частоту коливань f , а також товщину плівки розплаву h :

$$\lambda = \sqrt[3]{\frac{8\pi\sigma \tan h\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right)}{\rho f^2}}. \quad (4)$$

Після підстановки довжини капілярної хвилі у формулу (3) та прийняття значення $f(We, Oh, In) = 1$ отримаємо формулу (5), яку можна застосовувати для визначення середнього значення частинок, використовуючи значення густини та поверхневого натягу розплаву при відомій температурі T .

$$D_{\text{сер}} = 0,34\sqrt[3]{\frac{8\pi\sigma_T}{\rho_T f^2}}. \quad (5)$$

Проводячи дослідження процесу розпилення порошків технічного алюмінію у роботі [35] вчені використовували спрощене обладнання без застосування додаткового нагріву розплаву, що розливається. Схема процесу наведена на рис. 3, а методика розпилення виглядає наступним чином: графітовий тигель заповнювали гранульованим алюмінієвим порошком та поміщали в електромагнітне поле індуктора, тигель оснащували графітовим соплом для розливу, розплав алюмінію виливали на хвилевод з мідного сплаву, що коливався з частотою 60 кГц. Причому камеру процесу відкачували вакуумним насосом та заповнювали аргоном до тиску 100 мбар, в той час як піч відкачували та заповнювали аргоном до тиску 200 мбар, тобто розливка відбувалася під певним диференціальним тиском на додачу до гравітаційної складової. У даному дослідженні було вста-

новлено вплив амплітуди коливань на гранулометричний склад матеріалу і показано, що зниження амплітуди коливань звужує ширину розподілу розмірів частинок та знижує середній розмір частинок. Так, при амплітуді 9,9 мкм середній розмір частинок алюмінію становив 41,7 мкм, а при амплітуді 8,55 мкм — 31,8 мкм відповідно.

Розпилення плазмовою дугою за рахунок стоячої хвилі. Дослідження можливості розпилення металевих розплавів, використовуючи енергію акустичних високочастотних коливань, розпочалися в середині минулого століття, проте у 1987 р. дослідники Баукхейдж, Шокенберг та Веттерс у своєму патенті 39 178А зробили припущення щодо можливості інтенсифікації процесу за рахунок застосування двох коливальних контурів, хвилеводи яких знаходяться один навпроти одного та на які подаються ультразвукові коливання з незначною різницею в частоті. За такої умови між хвилеводами генерується стояча акустична хвиля близька до сферичної форми, а в проміжок між хвилеводами з тигля через сопло подається розплав металу, краплі якого розриває зсередини за рахунок кавітації, а подрібнені краплинки розлітаються радіально з наступним охолодженням.

В подальших статтях дослідники робіт [36] та [37] продемонстрували потенціал можливої технології розпилення за рахунок стоячої хвилі (Ultrasonic Standing Wave Atomization) та сформулювали теоретичні уявлення щодо процесів передачі акустичних коливань через газове середовище, передачу тепла та припущення щодо формування частинок з металевих розплавів, надаючи заключення про можливість отримання порошків з середнім розміром меншим за 15 мкм.

Проте реальних даних щодо реалізації цього підходу у розпилення металевих розплавів немає, а тільки орієнтовна схема технологічного обладнання закритого циклу, що представлена на рис. 4.

Не дивлячись на відсутність впровадження технології, цікавість має потенційне використання стоячої ультразвукової хвилі при плазмовому розпиленні пруткових та дровових матеріалів. Ми припускаємо, що акустичні коливання будуть поширюватися через газове середовище на плазму, а з неї — на розпилювану заготовку, що створить додатковий тиск відриву краплі розплаву.

З іншого боку ми припускаємо, що відповідно до досліджень [38], використання напрямлених одне на одного хвилеводів буде впливати на профіль плазмової дуги, обтискаючи її, та, відповідно, підвищуючи щільність енергії та теплоперенос, оптимізуючи чи інтенсифікуючи режим опла-

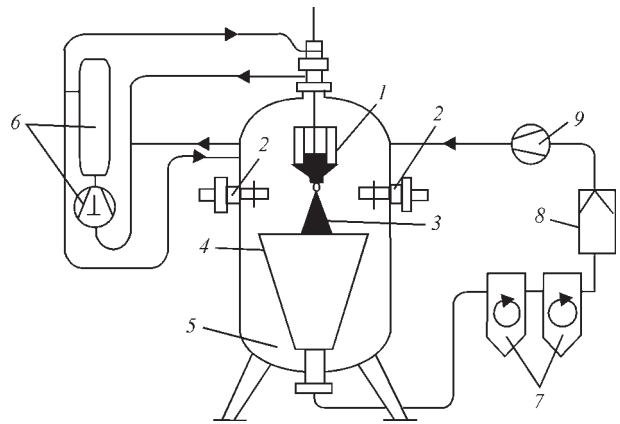


Рис. 4. Схема установки ультразвукового розпилення за рахунок стоячої хвилі [36]: 1 — тигель з розплавом; 2 — хвилеводи; 3 — конус розпилення; 4 — пристрій відведення відпрацьованих газів; 5 — бункер збірник; 6 — резервуар з робочим газом; 7 — циклон та сита; 8 — фільтр; 9 — компресор

лення заготовки. Це потенційно дозволить отримувати дрібніші порошки більш вузької фракції з вищою продуктивністю.

Розпилення електричною дугою з прикладанням коливань до розпилюваного матеріалу. Електродугове розпилення є давно відомим підходом, який традиційно використовується для наплення функціональних покриттів за технологією електродугової металізації. Вона характеризується відносною простотою та доступністю обладнання, що складається з блоку подачі дровів-електродів, системи подачі диспергуючого газу, системи живлення електричної дуги та камери розпилення. Також технологія відрізняється високою продуктивністю, яка в деяких випадках може досягати до 40 кг/год. Ця технологія забезпечує значний вихід дрібнодисперсної фракції (<63 мкм) та інші переваги. Однак, незважаючи на численні плюси, суттєвим недоліком електродугового розпилення є використання холодного газу для диспергування розплаву, що утворюється на кінці розпилюваних дровів. Це призводить до отримання порошків з високим вмістом частинок неправильної форми, сателітів та значною внутрішньою пористістю через захоплення розплавом диспергуючого газу, що ускладнює їх використання в адитивних технологіях [39, 40]. Схема процесу наведена на рис. 5.

Дослідники роботи [40] при розпиленні дровів з нержавіючої сталі AISI 630 та диспергуванні крапель розплаву аргонном у атмосфері аргону в реакторі отримали порошки з гранулометричним складом від 10 до 160 мкм при середньому розмірі частинок близько 70 мкм.

У роботі [41] автори проводили експерименти з розпилення алюмінієвих дровів електричною дугою при диспергуванні розплаву аргонном у атмосфері повітря та отримали частинки з коефіцієнтом

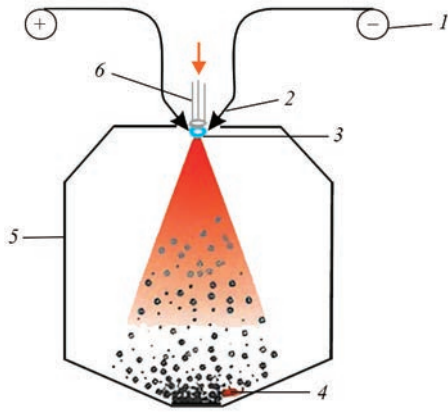


Рис. 5. Принципова схема електродугового розпилення дроту [40]: 1 — дріт; 2 — пристрій подачі дроту; 3 — електрична дуга; 4 — порошок; 5 — камера розпилення; 6 — електродуговий пальник

сферичності в діапазоні 0,71...0,81 при середньому розмірі частинок 50...80 мкм.

Повертаючись до можливості введення високочастотних коливань до дротів, що подаються в процесі електродугового розпилення, на даний момент відсутні дані щодо впровадження цього підходу, проте існує ряд досліджень процесів тепло- і масопереносу в електродугових процесах MIG/MAG при одночасній подачі ультразвукових коливань на зварювальний дріт. Ці дослідження показали активний вплив ультразвуку, прикладеного до дроту-катоду, на поверхневий натяг та прискорення, що є додатковим до прискорення вільного падіння за рахунок гравітації. Встанов-

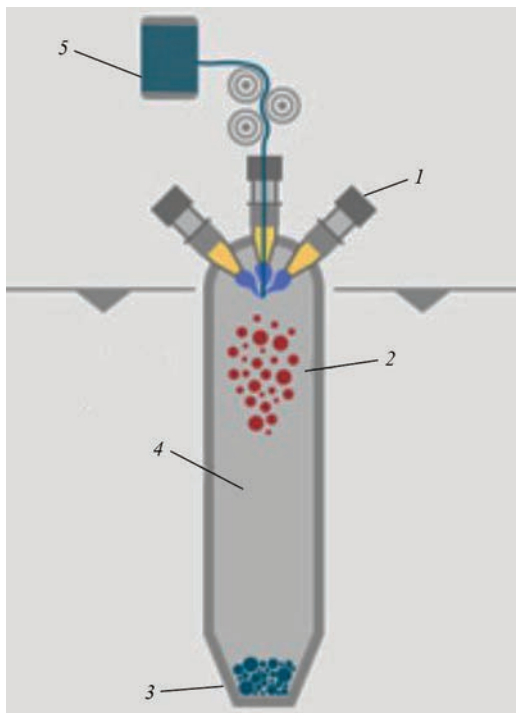


Рис. 6. Плазмове розпилення дроту за технологією PyroGenesis [44]: 1 — плазматрон; 2 — краплі розплаву; 3 — порошок; 4 — аргон; 5 — катушка дроту

лені закономірності при напівавтоматичному MIG зварюванні демонструють, що ультразвукові коливання сприяють формуванню витягнутих краплевидних частинок на протидію сферичним, що формуються при оплавленні торця дроту без коливань. Це, в свою чергу, дозволяє звужити ширину зони відриву, зменшуючи необхідну силу відриву та прискорюючи сам відрив на 20 %, що встановлено та змодельовано у роботах [11, 12].

З іншого боку, суттєвий вплив на саму електричну дугу мають ультразвукові коливання — електрична дуга звужується, а відповідно зростає щільність її енергії. В той же час, вкладення тепла в найменші складові частинки потоку металу при розплавленні дугою є значно вищими, адже за рахунок високочастотних коливань іонізовані частинки знаходяться в дузі довше після проходження резонансної частоти [7, 8]. Авторами робіт [9, 10] встановлено, що використання ультразвуку в технології напівавтоматичного зварювання плавким електродом у вигляді дроту демонструє більш активний перенос частинок розплаву з торця дроту: швидкість польоту крапель зростає на 10...20 % при збільшенні частоти відриву крапель у 3 рази. Цей ефект досягається резонансом плівки розплаву на торці дроту та флуктуаціями його поверхні, що призводить до інтенсифікації процесів масопереносу у зварювальну ванну [10].

Відповідно до цього можна зробити припущення про ймовірну активізацію процесу електродугового розпилення та зменшення енерговитрат на нього за рахунок звуження дуги зі збільшенням її питомої енергії. З іншого боку, такий процес вимагатиме використання двох окремих коливальних контурів для передачі ультразвуку на дріт-анод та дріт-катод. Цікавим може бути також вплив на процес розпилення, а саме — на формування краплі розплаву та її дезінтеграцію, кавітації та, можливо, стоячої хвилі, що формуватиметься між торцями дротів та розповсюджуватиметься через газове середовище, інтенсифікуючи розпилення та звужуючи діапазон розміру частинок.

Розпилення плазмовою дугою з ультразвуковими коливаннями, що прикладаються до розпилюваного матеріалу. Однією з найбільш перспективних технологій виробництва сферичних високоякісних порошоків є плазмове розпилення, яке не позбавлене своїх складнощів — велика кількість змінних робочих параметрів викликає складність отримання повторюваного результату та продуктивності. Так, в роботі [42] дослідили та встановили, що свій вплив на кінцевий розмір частинок порошку при розпиленні струмопровідного дроту має щонайменше вісім робочих параметрів,

при чому найбільший вплив на гранулометричний склад отриманих порошків мають струм дуги, швидкість подачі дроту, довжина дуги, витрата супутнього газу та зазор між плазмотвірним та обтискаючим соплами.

Один з комерційно реалізованих підходів до плазмового розпилення виконаний компанією «PyroGenesis». У процесі розпилення використовують три плазмотрони, між якими вводиться дріт без підведення електричного потенціалу, тобто плавлення матеріалу відбувається за рахунок тепла плазмової дуги, а розпилення — за рахунок тиску плазми [43]. Схематично такий процес наведено на рис. 6.

Не дивлячись на технологічність, продуктивність процесу плазмового розпилення порошків становить 2...3 кг/год по порошкам титанових сплавів та може бути збільшена до 5 кг/год при використанні додаткового індукційного нагріву дротового матеріалу перед подачею в робочу зону плазмотронів [43].

Існують різні підходи до підвищення продуктивності процесу плазмового розпилення, такі як розпилення матеріалу прямою плазмовою дугою, використання супутніх газових струменів з надзвуковою плазмою, а також гібридні технології [45]. Розвитком та дослідженням цих технологій займаються групи вчених по всьому світу, проте одним з гіпотетично можливих, але не реалізованих та не впроваджених шляхів оптимізації та інтенсифікації розпилення плазмовою дугою є прикладання ультразвукових коливань в дроти або прутки, що подаються в процес.

Аналіз ефективності та перспектив використання ультразвуку при плазмово-дуговому розпиленні дротових і пруткових матеріалів. Плазмово-дугове розпилення є одним з ефективних методів отримання сферичних металевих порошків, які широко застосовуються в авіаційній, ракетній та адитивній промисловостях. Удосконалення цього процесу шляхом введення ультразвукових коливань може суттєво покращити характеристики порошків, зокрема їхній гранулометричний склад та сферичність. Плазмово-дугове розпилення базується на використанні тепла високотемпературної плазми для оплавлення торця металевих дротів або прутків, зриву крапель розплаву та їх диспергування плазмовим струменем. Основними параметрами процесу є температура плазми, швидкість потоку, електричні параметри дуги та властивості розпилюваного матеріалу. Вплив цих параметрів визначає кінцеві характеристики отриманого порошку.

Крім того перспективним є введення ще одного виду впливу, а саме — ультразвукових коливань, що при розповсюдженні через розпилюваний матеріал знижують поверхневий натяг півки розплаву, викликають інтенсифікацію тепло- та масопереносу, створюють додатковий тиск на краплю розплаву, прискорюючи її зрив, сприяють подрібненню вихідної краплі та покращенню однорідності розпилення. У відповідності до проведених у роботі [33] досліджень, в якій проводиться порівняння ультразвукового розпилення на хвилеводі з традиційним газовим розпиленням, введення високочастотних коливань в розплав металу сприяє підвищенню виходу дрібнодисперсних частинок вузького гранулометричного складу $-63 + 20$ мкм до 80...90 % за рахунок зменшення вихідного розміру краплі розплаву. Причому, відповідно до рівнянь (1) і (5), значний вплив на критичний (вихідний) розмір краплі чинить частота коливань, що прикладається до розплаву. З підвищенням частоти знижується розмір частинок.

В ході досліджень авторами роботи [4] встановлено, що використання ультразвукових коливань, накладених на зварювальний дріт, сприяє підвищенню теплопровідності частинок у плазмовій дузі при збільшенні коефіцієнта термічної дифузії та збільшення тиску, що створює дуга. Останнє було математично змодельовано та експериментально підтверджено авторами робіт [5, 6]. Запропонована математична модель (6) враховує вплив на тиск дуги наступних змінних: параметрів дуги, геометричних параметрів сопла, щільності технологічного газу та швидкості плазмового потоку, а також величини звукового тиску. Виходячи з встановлених закономірностей, амплітуда коливання торця дроту вносить значний вклад в тиск дуги, збільшуючи його на 15...31 %:

$$P(x, y, z) = \frac{\eta_v 3r_{\text{сопл}}^2 \rho_{\text{Аг}} Q_{\text{плаз}}}{A_1 S_{\text{сопл}}} \times \sqrt{\frac{P_{\text{кол}}^2}{\rho_{\text{Аг}}^2 c^2} + \frac{2\eta_v IU}{\rho_{\text{Аг}} Q_{\text{плаз}}} + \frac{Q_{\text{плаз}}^2}{S_{\text{сопл}}^2} \frac{\mu_0 I^2}{4\pi^2 r_p^2}} \times \exp\left(-3 \frac{x^2 + y^2}{r_p^2}\right) \quad (6)$$

Коллективи авторів у роботах [13, 14] провели дослідження, що узгоджуються з теорією та підтверджуються високошвидкісною відеозйомкою. Встановлено, що коливання дроту з частотою від 1 кГц і вище сприяють більш ранньому відриву краплі, а

при частоті 20 кГц досягається найефективніший режим зриву нової краплі при кожному коливанні.

Математичне моделювання, що було проведено в роботі [10], пропонує описання величини сили ультразвуку F_U , що діє на краплю розплаву (7) як таку, що залежить від густини газового середовища ρ , в якому розповсюджуються коливання, амплітуди коливань A , кількості хвиль k , радіусу частинки R та коефіцієнта λ , що враховує співвідношення між густиною середовища до густини краплі розплаву:

$$F_U = \frac{1}{3} \pi \rho A^2 (kR)^3 \sin(2k) \frac{5 - 2\lambda}{2 + \lambda}. \quad (7)$$

Відповідно до наших припущень та наведених вище результатів досліджень, досвід введення ультразвукових коливань у розплав може бути перенесений на процес плазмового розпилення компактних матеріалів. Так, накладання ультразвукових коливань при плазмово-дуговому розпиленні має перспективність підвищення інтенсифікації процесу диспергування та збільшення виходу фракції –63 мкм до 80...90 %. Причому, найбільш перспективним варто розглядати процес розпилення плазмовою дугою прутків і дротів з прикладанням до них ультразвукових коливань, що розповсюджуються по матеріалу дротів та прутків, як по хвилеводу, до торця з швидкістю, що значно перевищує швидкість розповсюдження в газовому середовищі.

Висновки

1. Обґрунтовано підхід удосконалення процесу розпилення розплавів шляхом введення ультразвукових коливань, що при розповсюдженні через розпилюваний матеріал або газове середовище, який дозволяє знизити поверхневий натяг півки розплаву, інтенсифікувати масоперенос, подрібнення крапель і покращення однорідності розпилення. Основним механізмом такого впливу є виникнення у краплях розплаву капілярних хвиль і кавітації під час розповсюдження в них високочастотних коливань, що, в свою чергу, чинить додатковий тиск на краплю розплаву та знижує необхідне зусилля для зриву краплі. Все це суттєво покращує технологічні характеристики отриманих порошків, зокрема сприяє зменшенню розмірів часток і підвищенню параметра сферичності.

2. Проведений аналіз ефективності використання ультразвуку при плазмово-дуговому розпиленні дрових і пруткових матеріалів підтвердив перспективність введення ультразвукових коливань не в газове середовище або плазмову дугу, що є малоєфективним через невисоку швидкість розповсюдження акустичних коливань у газах, а саме

до розпилюваної заготовки у вигляді дротів або прутків, що сприяє більш частому зриву крапель розплаву з торця, що оплавляється, при зменшенні розміру вихідних крапель. Відповідно до наших припущень, накладання ультразвукових коливань на дрони та прутки при розпиленні плазмовою дугою підвищить вихід дрібнодисперсних сферичних частинок класу –63 мкм з 40...50 до 80...90 %.

Список літератури/References

- Shoh, A. (1975) Industrial applications of ultrasound — A review I. High-power ultrasound. *IEEE Transact. on Sonics and Ultrasonics*, 22(2), 60–70. DOI: <https://doi.org/10.1109/t-su.1975.30780>
- Škamat, J., Valiulis, A.V. (2010) About the possibility of using ultrasound in thermal spray technologies. *Mokslas-Lietuvos Ateitis*, 2(4), 39–41. DOI: <https://doi.org/10.3846/mla.2010.066>
- Kumar, S., Wu, C.S., Padhy, G.K., Ding, W. (2017) Application of ultrasonic vibrations in welding and metal processing: A status review. *J. of Manufacturing Proc.*, 26, 295–322. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.02.027>
- Li, Y., Wu, C., Chen, M. (2020) Effects of ultrasonic vibration on the transport coefficients in plasma arc welding. *Metals*, 10(3), 312. DOI: <https://doi.org/10.3390/met10030312>
- Wu, C.S., Zhao, C.Y., Zhang, C., Li, Y.F. (2017) Ultrasonic vibration assisted keyholing plasma arc welding. *Welding J.*, 96, 279–287
- Qiao, J., Wu, C.-S., Li, Y. (2020) Numerical and experimental investigation of keyholing process in ultrasonic vibration assisted plasma arc welding. *J. of Manufacturing Proc.*, 50, 603–613. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.01.019>
- Fan, C.L., Yang, C.L., Lin, S.B., Fan, Y.Y. (2013) Arc characteristics of ultrasonic wave-assisted GMAW. *Welding J.*, 92(12), 375–380.
- Fan, C., Zhou, L., Liu, Z. et al. (2018) Arc character and droplet transfer of pulsed ultrasonic wave-assisted GMAW. *Inter. J. Ad. Manuf. Technol.*, 95, 2219–2226. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1414-7>
- Weifeng, X., Fan, C.L., Yang, C.L., Lin (2016) Pulsed ultrasonic wave assisted GMAW of 7 A 52 aluminum alloy. *Welding J.*, 95, 239–247.
- Luo, J., He, Z., Liu, Z. et al. (2024) The influence of coaxial ultrasound on the droplet transfer of high nitrogen steel GMAW process. *Materials*, (17), 5509, 14. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17225509>
- Fan, Y.Y., Yang, C.L., Sanbao, L. et al. (2012) Ultrasonic wave assisted GMAW: A novel method adds ultrasonic wave to provide an additional force to detach the droplet. *Welding J.*, 91, 91–99.
- Zheng, H, Qi, B., Yang, M. (2021) Dynamic analysis of the ultrasonic-frequency pulsed GMAW metal transfer process. *J. of Manufacturing Proc.*, 62, 283–290. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.12.049>
- Kaiyuan, W., Jing, L., Haoran, Y. et al. (2024) Influence of high-frequency pulse on droplet transfer process and weld formation in double-wire median pulsed GMAW of aluminum alloy. *Research Square*. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4308754/v1>. <https://www.researchsquare.com/article/rs-4308754/v1>
- Ghosh Prakriti K., Lutz Dorn M.C. Hübner, Vinay K. Goyal (2007) Arc characteristics and behaviour of metal transfer in pulsed current GMA welding of aluminium alloy. *J. of Materials Proc. Technology*, 194, 163–175.

15. Shanthar, R., Chen, K., Abeykoon, C. (2023) Powder-based additive manufacturing: A critical review of materials, methods, opportunities, and challenges. *Advanced Eng. Materials*, (25), 2300375, 43. DOI: <https://doi.org/10.1002/adem.202300375>
16. Fatemeh, A.T., Zobaideh, H., Kahrizsangi, S. et al. (2024) Spreadability of powders for additive manufacturing: A critical review of metrics and characterisation methods. *Particuology*, 93, 211–234. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.partic.2024.06.013>
17. Barreras, F., Amaveda, H., Lozano, A. (2002) Transient high-frequency ultrasonic water atomization. *Experiments in Fluids*, 33, 405–413. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00348-002-0456-1>
18. Lozano, A., García, J., Alconchel, J. et al. (2017) Influence of liquid properties on ultrasonic atomization. In: *Proc. of 28th European Conf. on Liquid Atomization and Spray Systems (ILASS2017)*. DOI: <https://doi.org/10.4995/ILASS2017.2017.4588>
19. Rajan, R., Pandit, A.B. (2001) Correlations to predict droplet size in ultrasonic atomisation. *Ultrasonics*, 39(4), 235–255. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0041-624x\(01\)00054-3](https://doi.org/10.1016/s0041-624x(01)00054-3)
20. Camacho-Lie, M., Antonio-Gutiérrez, O., López-Díaz, A.S. et al. (2023) Factors influencing droplet size in pneumatic and ultrasonic atomization and its application in food processing. *Discover Food*, 3(23). DOI: <https://doi.org/10.1007/s44187-023-00065-5>
21. Dobre, M., Bolle, L. (2002) Practical design of ultrasonic spray devices: Experimental testing of several atomizer geometries. *Experimental Thermal and Fluid Sci.*, 26, 205–211. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0894-1777\(02\)00128-0](https://doi.org/10.1016/S0894-1777(02)00128-0)
22. Patil, M.N., Pandit, A.B., Thorat, B.N. (2007) Ultrasonic atomisation assisted spray drying. In: *Proc. of the 5th Asia-Pacific Drying Conf.*, 255–261. DOI: https://doi.org/10.1142/9789812771957_0036
23. Khaire, R., Gogate, P. (2020) Novel approaches based on ultrasound for spray drying of food and bioactive compounds. *Drying Technology*, 39(12), 1832–1853. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.180492639>
24. Marie, A., Tourbin, M., Robisson, A.C. et al. (2021) Wet size measurements for the evaluation of the deagglomeration behaviour of spray-dried alumina powders in suspension. *Ceramics Inter.*, 48(6), 7926–7936. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.11.340>
25. Nandiyanto, A., Okuyama, K. (2011) Progress in developing spray-drying methods for the production of controlled morphology particles: From the nanometer to submicrometer size ranges. *Advanced Powder Technology*, 22 (1), 1–19. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apt.2010.09.011>
26. Zhou, K., Han, C. (2023) Metal powder-based additive manufacturing. 319. DOI: <https://doi.org/10.1002/9783527822249>
27. Chen, G., Zhao, S., Tan, P. et al. (2018) A comparative study of Ti–6Al–4V powders for additive manufacturing by gas atomization, plasma rotating electrode process and plasma atomization. *Powder Technology*, 333, 38–46. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.04.013>
28. Rai, G., Lavernia, E., Grant, N. J. (1985) Powder size and distribution in ultrasonic gas atomization. *JOM*, 37(8), 22–26. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf03257674>
29. Baram, J. (1988) Pressure characteristics at the pour-tube orifice in ultrasonic gas atomization. *Materials Sci. and Eng.*, 98, 65–69. DOI: [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(88\)90128-0](https://doi.org/10.1016/0025-5416(88)90128-0)
30. Anand, V., Kaufman, A.J., Grant, N. (1978) Rapid solidification of a modified 7075 aluminum alloy by ultrasonic gas atomization. *Rapid Solidification Processing, Principles and Technologies, II*, Claitor, Baton Rouge, LA, 273–286.
31. Orlov, Y., Mamedov, B. (1983) Ultrasonic atomization of liquid metals. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 22(4), 254–255. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf00795594>
32. Żrodowski, Ł., Wróblewski, R., Choma, T. et al. (2021) Novel cold crucible ultrasonic atomization powder production method for 3D printing. *Materials*, 14(10), 2541, 11. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14102541>
33. Halapi, D., Varga, L. (2023) Ultrasonic powder atomization for additive manufacturing. *Inter. J. of Eng. and Management Sci.*, 8(2), 69–75. DOI: <https://doi.org/10.21791/IJEMS.2023.2.8>
34. Bałasz, B., Bielecki, M., Gulbiński, W., Słoboda, Ł. (2023) Comparison of ultrasonic and other atomization methods in metal powder production. *J. of Achievements in Materials and Manufacturing Eng.*, 116(1), 11–24. DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0016.3393>
35. Priyadarshi, A., Shahrani, S., Choma T. et al. (2024). New insights into the mechanism of ultrasonic atomization for the production of metal powders in additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 83(1), 104033, 20. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104033>
36. Bauckhage, K., Andersen, O., Hansmann, S. et al. (1996) Production of fine powders by ultrasonic standing wave atomization. *Powder Technology*, 86(1), 77–86. DOI: [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(95\)03040-9](https://doi.org/10.1016/0032-5910(95)03040-9)
37. Andersen, O., Hansmann, S., Bauckhage, K. (1996) Production of fine particles from melts of metals or highly viscous fluids by ultrasonic standing wave atomization. *Particle & Particle Systems Characterization*, 13(3), 217–223. DOI: <https://doi.org/10.1002/ppsc.19960130308>
38. Irisarri, J., Ezcurdia, I., Iriarte, N. et al. (2025) Electric plasma guided with ultrasonic fields. *Sci. Advances*, 11(6): eadp0686. 6. DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.adp0686>
39. Korzhyk, V.M., Strogonov, D.V., Burlachenko, O.M. et al. (2024) Development of hybrid technology of producing spherical powders from wire materials using high-speed plasma jets and electric arc. *Suchasna Elektrometalurhiya*, 3, 36–44. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2024.03.05>
40. Chen, D., Daoud, H., Scherm, F. et al. (2020) Stainless steel powder produced by a novel arc spray process. *J. of Materials Research and Technology*, 9, 8314–8322. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.05.076>
41. Dietrich, S., Zaeh, M.F. (2019) Arc-based powder production of AlSi7Mg0.6. *Procedia Manufacturing*, 40, 27–31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.006>
42. Strogonov, D.V., Korzhyk, V.M., Jianglong, Yi et al. (2022) Influence of the parameters of the process of plasma-arc spheroidization of current-conducting wire from low-carbon steel on the granulometric composition of the produced powders. *Suchasna Elektrometalurhiya*, 3, 29–37. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2022.03.05>
43. Dion, C., Carabin, P., Kreklewitz, W. (2021) *Plasma apparatus for the production of high quality spherical powders at high capacity*. European Pat. EP3302855B1. <https://pyrogenesisadditive.com/#plasmaAtomization>
44. Korzhyk, V.M., Strogonov, D.V., Burlachenko, O.M. et al. (2023) Development of plasma-arc technologies of spherical granule production for additive manufacturing and granule metallurgy. *The Paton Welding J.*, 12, 3–18. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.12.01>

PROSPECTS OF ULTRASOUND APPLICATION IN THE PRODUCTION OF DISPERSED GRANULES BY GAS AND PLASMA-ARC ATOMIZATION OF METAL MELTS AND COMPACT MATERIALS (Review)

V.M. Korzhyk, O.S. Tereshchenko, D.V. Strohonov, O.I. Demianov, O.V. Ganushchak
E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: vnkorzhykn@gmail.com

The technological features of using the ultrasonic vibrations for atomization of micro-volumes of metal melts in the following technologies of dispersed spherical powder production are considered: gas atomization, ultrasonic atomization on sonotrode, plasma arc atomization by means of ultrasonic standing wave, electric arc atomization with the application of ultrasound to the atomized wire, and plasma arc atomization with the application of ultrasonic vibrations to the atomized feedstock. The influence of ultrasonic vibrations on the process of melt droplet formation and detachment for the aforementioned methods is analyzed. It is established that the application of ultrasound promotes a reduction in the size of initial melt droplets, intensifies dispersion due to the creation of additional pressure on the melt droplets, and, as a result, contributes to the narrowing of the particle size distribution. It was found that among the analyzed approaches for obtaining spherical powders using high-frequency acoustic vibrations, the most promising is the technology of plasma arc atomization of wires and rods under the condition of applying ultrasound directly to the feedstock. An analysis of the efficiency and prospects of using plasma-arc atomization technologies with introduction of ultrasonic vibrations into the atomized feedstock is conducted, and it is assumed that this approach will allow increasing the yield of ~63 μm fraction powders up to 80..90 %, which is promising for application in the production of powders for additive manufacturing technologies. 45 Ref., 6 Fig.

Keywords: ultrasonic atomization, dispersion, plasma-arc atomization, gas atomization, spherical powders, particle size distribution

Отримано 23.04.2025

Отримано у переглянутому вигляді 28.04.2025

Прийнято 22.07.2025

ПЕРЕДПЛАТА 2026

Журнали	Вартість передплати на друковані версії журналів*, грн.			
	місяць	квартал	півроку	рік
«Автоматичне зварювання», видається з 1948 р., 6 випусків на рік. ISSN 3041-234X (Online). ISSN 3041-2374 (Print). Передплатний індекс 70031	–	–	1260	2520
«Сучасна електрометалургія», видається з 1975 р., 4 випуски на рік. ISSN 3041-2331 (Online). ISSN 3041-238 (Print). Передплатний індекс 70693	–	420	840	1680
«Технічна діагностика та неруйнівний контроль», видається з 1989 р., 4 випуски на рік. ISSN 3041-2358 (Online). ISSN 3041-2366 (Print). Передплатний індекс 74475	–	420	840	1680
«The Paton Welding Journal»**, видається з 2000 р., 12 випусків на рік. ISSN 3041-2293 (Online). ISSN 0957-798X (Print). Передплатний індекс 21971.	600	1800	3600	7200

*Вартість з урахуванням доставки рекомендованою банделроллю.

** Журнал «The Paton Welding Journal» містить статті, отримані від авторів з усього світу і вибірково переклади на англійську мову статей з журналів «Автоматичне зварювання», «Сучасна електрометалургія», «Технічна діагностика та неруйнівний контроль».

Передплату на журнали можна оформити по каталогам передплатних агенцій «УКРПОШТА», «Прес Центр» та у видавництві. Передплата через видавництво з любого місяця на любой термін, в т.ч. на попередні періоди та окремі статті, починаючи з першого року видання.

Передплата на електронну версію журналів.

Вартість передплати на електронну версію журналів дорівнює вартості передплати на друковану версію. Випуски журналу надсилаються електронною поштою у форматі pdf або для IP-адреси комп'ютера передплатника надається доступ до відповідних архівів журналу.

Передплата через сайт видавництва:

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as/subscription>

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/sem/subscription>

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk/subscription>

<https://patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj/subscription>

На сайті видавництва у 2026 р. доступні для вільного копіювання випуски журналів з 2007 по 2024 рр.

РЕАЛІЗАЦІЯ ТА СТІЙКІСТЬ ПРОЦЕСУ ГАЗИФІКАЦІЇ БІОМАСИ ЗА ДОПОМОГОЮ ПЛАЗМОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

С.В. Петров¹, О.І. Сом², С.Г. Бондаренко³, О.В. Сангінова³, М. Ганчарський⁴, Е. Рой⁴

¹Інститут газу НАН України. 03113, м. Київ, вул. Дегтярівська, 39. E-mail: vizana.sp@gmail.com

²ТОВ фірма «Плазма-Мастер». 03142, м. Київ, вул. Омеляна Прицака, 3. E-mail: info@plasma-master.com

³НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

03056, м. Київ, Берестейський просп., 37. E-mail: s_g_bondarenko@ukr.net

⁴Hydrogenium P.S.A. (Simple Joint Stock Company).

20-029, м. Люблін, вул. Марії Склодовської-Кюрі, 3/27, Польща. E-mail: mg@hydrogenium.one

Технології газифікації відходів біомаси спрямовані на виробництво водню мають потенціал широкомасштабної комерціалізації. Передумовами для їхнього розвитку та просування є інноваційні підходи до моделювання; використання традиційних і нових механізмів газифікації, узгоджених із фундаментальними основами теоретичної фізики; розробка на цьому підґрунті нових технічних рішень. Зрештою, завдання полягає в істотному поліпшенні техніко-економічних та екологічних показників процесу газифікації. У такому контексті плазмова газифікація виявляється перспективним джерелом отримання відновлюваної енергії з різноманітних відходів, зокрема біомаси, а також сприяє досягненню цілей сталого розвитку: доступна й чиста енергія, боротьба зі зміною клімату, запобігання потраплянню відходів на сміттєзвалища та повторне використання ресурсів, що в сукупності зміцнює концепцію циркулярної економіки. Ця стаття містить аналіз і оцінку умов підвищення надійності, продуктивності та якості процесів газифікації при зниженні витрат, включно з потенційними перешкодами застосування плазмових технологій. У роботі показано нові технологічні рішення проблем стосовно газифікації, спрямовані на оптимізацію потоків енергії в реакторі газифікації, раціональне використання плазми як концентрованого потоку енергії, зниження споживання електроенергії плазмовими пальниками, зменшення потужності та вартості плазмових установок, а також радикального вирішення проблеми надійності газифікаційного обладнання. Розглянуто економічні перспективи переходу до великотоннажного виробництва для зниження капітальних і експлуатаційних витрат. Бібліогр. 85, рис. 22.

Ключові слова: газифікація біомаси, плазмова газифікація, плазмотрон, синтез-газ, газифікатор, енергоефективність процесу газифікації

Вступ. Технічне рішення з перетворення біомаси на паливний газ, що називається газифікацією, є ключовою технологією для отримання продуктів з більшою цінністю та потенційними можливостями застосування порівняно з вихідною сировиною. Необхідними умовами для розвитку цієї технології є передові, інноваційні та економічні методи з високим коефіцієнтом корисної дії. Стратегія підвищення здійсненності та стійкості процесу газифікації біомаси полягає в технологічному прогресі та мінімізації соціально-екологічних наслідків [1]. Використання біомаси має перевагу перед іншими поновлюваними джерелами енергії, оскільки воно менше залежить від місця розташування та клімату. Біомаса легко зберігається й транспортується, також доступна в достатній кількості. Це робить її життєздатною та перспективною сировиною в якості джерела енергії. Нині біомаса забезпечує понад 10 % світового енергопостачання та входить до четвірки найбільших джерел енергії за обсягом кінцевого світового споживання енергії [2].

Переробка відходів біомаси із застосуванням газифікації порівняно з іншими наявними методами, такими як захоронення, спалювання тощо, має перевагу, оскільки вона може перетворювати широкий спектр різноманітних вихідних матеріалів на безліч корисних продуктів. Газифікація біомаси являє собою складний процес, що включає підготовку сировини, потім комбінування піролізу, часткового спалювання проміжних продуктів з остаточною газифікацією, видаленням неорганічного залишку, очищенням і розділенням синтез-газу. Важливу роль у перетворенні проміжних продуктів — твердого вуглецю та важких вуглеводнів на низькомолекулярні гази, такі як монооксид вуглецю (CO) і водень (H₂), відіграє середовище газифікації. Якість і властивості синтез-газу залежать від складу вихідного матеріалу, розмірів, газифікуючого агента, розподілу температури і дуття в реакторі, а також від його конструкції. Газифікація біомаси дає безліч корисних складових на виході, зокрема: синтез-газ, тепло, електроенергію, зеле-

С.В. Петров — <https://orcid.org/0000-0003-0373-8003>, О.І. Сом — <https://orcid.org/0009-0009-4152-4832>,

С.Г. Бондаренко — <https://orcid.org/0000-0003-2305-6691>, О.В. Сангінова — <https://orcid.org/0000-0001-6378-7718>,

М. Ганчарський — <https://orcid.org/0009-0009-0355-0677>, Е. Рой — <https://orcid.org/0000-0002-8691-3315>

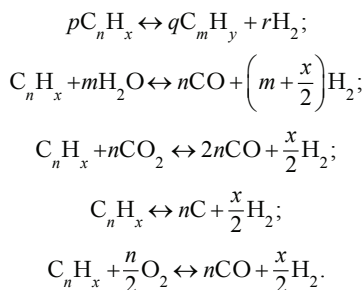
© С.В. Петров, О.І. Сом, С.Г. Бондаренко, О.В. Сангінова, М. Ганчарський, Е. Рой, 2025

ний водень, добрива. Синтез-газ може бути додатково перероблений на метанол, диметиловий ефір та інші хімічні продукти.

Газифікація біомаси для виробництва водню забезпечує видатні переваги з точки зору поновлюваних енергоресурсів, вуглецевої нейтральності, високої ефективності та екологічних переваг. Проте фактори, що впливають на виробництво H_2 під час газифікації біомаси, є складними, що утруднює визначення оптимальних умов експлуатації [3].

Мета роботи — оцінити та класифікувати плазмові технології газифікації біомаси виходячи з умов підвищення продуктивності та якості при зниженні витрат, включно з потенційними перешкодами.

Результати дослідження. Спільним недоліком типових газифікаторів, як з висхідною, так і з низхідною або комбінованою тягою, є те, що більшою чи меншою мірою у виробленому газі містяться смоли, що є надто проблематичним для багатьох сучасних застосувань. Наявність смол вважається найбільш незручною проблемою, яку потрібно вирішувати, особливо під час роботи з великомасштабними системами. Традиційно як рішення використовується паровий риформінг за підвищених температур. Газифікація парою є ефективним методом, що добре зарекомендував себе [4, 5]. При цьому виробництво коксу та смол невелике, оскільки пара перетворює їх на CO і H_2 шляхом реакції водяного зсуву й риформінгу. Смоли ніколи не є бажаним продуктом і, отже, знижують ефективність процесу. Вихід смоли може бути зменшений шляхом термічного крекінгу, парового риформінгу, сухого риформінгу, вуглецеутворення та часткового окиснення, що показано в наступних реакціях:



Автори робіт [6–9] встановили, що вихід H_2 за парової газифікації в рази вищий, ніж за повітряної газифікації. Також повідомляється про підвищення економічної ефективності при збільшеному виробництві H_2 з використанням пари як середовища при газифікації. Слід зазначити корисну для подальших розробок технологічну

спробу подолання даної проблеми — це концепція багатоступеневої газифікації, яку застосовано в Danish Technical University (Данія) and Karlsruhe Institute of Technology (Німеччина) [10, 11]. Зазначена нетипова стратегія газифікації розділяє піроліз і газифікацію біомаси на окремі ступені з індивідуальним управлінням, які потім інтегруються. Піроліз і газифікація виконуються в розділених зонах всередині газифікатора. Це дає змогу переробляти біомасу в придатні для використання продукти. Основним мотивом такої концепції є отримання високоякісного чистого синтез-газу з низьким вмістом смол. Допустимі рівні смоли залежать від подальшого застосування. Вони становлять близько 50, 5 і 1 $mg \cdot m^{-3}$ для газових двигунів, газових турбін і паливних елементів відповідно до роботи [12]. У всіх випадках у вихлопі значною мірою присутні зола та пил. Життєво важливим етапом між виробництвом газу в газифікаторі та його утилізацією є очищення газу. Газ, що виходить із системи газифікації біомаси, забруднений смолами, лужними металами, твердими частинками, азотом (N_2), сіркою (S) та хлором (Cl). Згідно з проведеними дослідженнями, донедавна при газифікації біомаси питання очищення газу були найскладнішими [13]. Для розв'язання цієї проблеми було розроблено різні типи газифікаторів із висхідною та низхідною тягою, а також досліджено низку фізичних і каталітичних методів відокремлення смол. Однак для комерційних цілей найбільш ефективний і популярний метод ще належить розробити. Насправді, ефективні методи газифікації та очищення газу дають змогу отримувати високоякісний газ в ідеальному випадку без смол [14], що знижує загальне споживання біомаси, і в підсумку зменшуються проблеми з логістикою та попередньою обробкою біомаси.

У процесах газифікації використовується також плазма, причому двома різними способами: 1-й — як джерело тепла; 2-й — для крекінгу смол після стандартної газифікації. Плазмову газифікацію насамперед використовують для переробки токсичних органічних відходів, твердих побутових відходів, а також гуми та пластмас. Плазмова технологія також викликала інтерес для виробництва синтез-газу й вироблення електроенергії та увійшла в комерційно конкурентоспроможний діапазон. Основними перевагами плазмової газифікації є вихід синтез-газу з високим вмістом H_2 і CO , підвищеним вмістом тепла, низьким виходом CO_2 і низьким вмістом смоли [15–19]. Головними обмеженнями є високі капітальні та експлуатаційні витрати через велике споживання електроенергії для генерації плазми, що призводить до

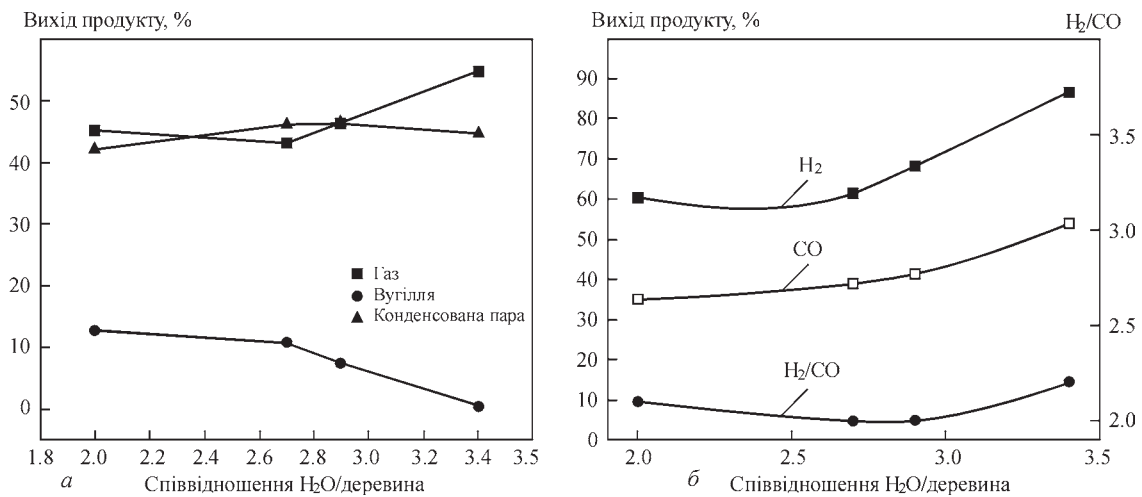


Рис. 1. Вплив співвідношення H₂O та деревини на вихід продукту: а — загальний масовий вихід; б — вихід газів H₂ і СО та співвідношення H₂/СО

низької загальної ефективності. Наприклад, базовий сценарій з установкою з переробки відходів продуктивністю 680 тонн на день, що підійде для невеликого міста або регіонального підприємства, обійдеться в £ 97 мільйонів, що майже втричі перевищує вартість інших установок з переробки відходів (наприклад, інсинераторів).

Показовими є дослідження роботи [20]. Чотири різних види біомаси — деревна тирса, відходи пластику та мастило, що отримане під час піролізу відпрацьованих шин, були досліджені в електродуговому реакторі постійного струму за потужності факела 100 кВт. Невелику кількість аргону з парами H₂O використовували як плазмоутворювальний газ, а H₂O — як окислювальне середовище. Отримано високоякісний синтез-газ, що містить 90 об. % H₂ і СО для всіх чотирьох видів сировини, вміст смоли був нижчим за чутливість методу аналізу (1 мг/нм³). Ці обставини компенсуються вищою потребою в електроенергії. Незважаючи на високий вміст тепла у вихідних газах, зареєстрований для всіх наборів даних, ефективність процесу виявилася низькою через високі витрати електроенергії, що значною мірою є обмежувальним фактором для цієї технології. Моделюванням хімічних процесів та експериментальними дослідженнями [21, 22] встановлено, що синтез-газ з високим вмістом H₂ і СО може бути ефективно отримано з відходів біомаси за допомогою пароводяної плазми. Конверсію деревини в середовищі плазми водяної пари проводили за таких експериментальних умов: витрата деревини 1,2 г/с, витрата пари 2,63...4,48 г/с, потужність плазмотрона 49...56 кВт. У діапазоні співвідношень H₂O/деревина 2,0...3,4 середньомасова температура підтримувалася на рівні T = 2800 К. Деревина була повністю перетворена на газ, рідину

(водяну пару), як показано на рис. 1. За потужності плазмового пальника 56 кВт і співвідношення H₂O/деревина — 3/4 час перебування був достатнім для перетворення деревини на газ, рідину та деревне вугілля. Вихід деревного вугілля в загальній масі продуктів реакції знизився до 0,5 %, а вихід газу збільшився до 55 %, що забезпечує ефективність конверсії вуглецю до 97,5 %.

З рис. 1, а випливає, що складовою масового балансу є конденсована вода, яка не повністю прореагувала та використовувалася як плазмоутворюючий газ. Таким чином, потрібна оптимальна організація процесу конверсії. Кількість деревного вугілля в масовому балансі продуктів реакції знижується до 0,5 %, що свідчить про великий потенціал термоплазмової технології для ефективної обробки органічних матеріалів. З іншого боку, низький вихід монооксиду вуглецю вимагає зробити процес конверсії більш селективним. Тому для зменшення кількості монооксиду вуглецю можна використовувати спеціальні катализатори. З огляду на включення водневої енергетики до енергетичного балансу та порівняння методів перетворення біомаси на водень з точки зору вартості енергоспоживання в кВт·год за кг, техніко-економічних обмежень, впливу на навколишнє середовище важливого значення набуває підвищення ефективності, рівень розвитку технологій та розробка катализаторів [23].

Плазму може бути утворено з повітря, O₂, водяної пари, N₂, Ar, CO₂ або суміші цих газів. Таким чином, плазмова газифікація є перспективним джерелом отримання відновлюваної енергії з твердих відходів, а також сприяє досягненню цілей сталого розвитку: доступна й чиста енергія, боротьба зі зміною клімату, запобігання потраплянню відходів на сміттєзвалища та повторне

використання ресурсів, що в сукупності зміцнює концепцію циркулярної економіки. Плазмова газифікація відходів, на відміну від звичайного спалювання, надійно знищує високотоксичні діоксини, бензопірен і фурані. Висока температура руйнує всі смоли, деревне вугілля та діоксини, внаслідок чого виходить чистіший синтез-газ, ніж за звичайної газифікації. Слід зазначити, що плазмова газифікація — новітня технологія серед сучасних методів утилізації відходів. Для розвитку традиційної газифікації було виконано багато роботи. За даними Ради з газифікації та сингазних технологій, наразі у світі діють 272 газифікаційні установки з 686 газифікаторами, і ще 74 установки з 238 газифікаторами перебувають у стадії будівництва. Більшість із них використовують вугілля як сировину. Тільки п'ять комерційних установок плазмової газифікації використовуються у світі для переробки відходів [24]. Зусилля розробників останніх років у сфері плазмової газифікації спрямовані на підвищення ефективності процесу, поліпшення екологічних та економічних показників завдяки розробленню передових систем перетворювачів, газоочищення, каталізаторів, систем моніторингу та управління, модульних конструкцій установок, поліпшених матеріалів і альтернативних джерел енергії. Плазмова газифікація стає реально перспективною технологією для утилізації відходів та отримання енергії.

Нині на сайті Ради з газифікації зазначається, що діючі плазмові газифікатори є в Японії, Канаді та Індії. Вводиться в експлуатацію новий завод з переробки ТПВ продуктивністю 2000 тонн на добу в Ті-Веллі (Великобританія), який після спорудження стане найбільшим плазмовим газифікатором у світі [25]. Завод Tees Valley One (TV1), побудований недалеко від Біллінгема, перероблятиме попередньо оброблені муніципальні, комерційні та промислові відходи, які постачає компанія Impetus Waste Management, виводячи їх із прилеглого звалища. Названий «найбільшим газифікаційним заводом у світі», він використовуватиме технологію плазмової газифікації, надану канадською компанією Alter NRG, для перетворення відходів на енергію для Національної мережі. Очікується, що він вироблятиме достатньо електроенергії, щоб забезпечити енергією 50 000 будинків. Вартість заводу, дозвіл на будівництво якого було отримано від ради району Стоктон-он-Тіс у 2011 р., оцінюють у 500 мільйонів доларів (320 мільйонів фунтів стерлінгів), його майже повністю фінансує американська компанія Air Products, а в 2010 р. One North East також виділила грант у розмірі 260 тисяч фунтів стерлінгів

[25]. Однак виникли проблеми, пов'язані з проектуванням та експлуатацією. Наприклад, у Південній Кореї також було зроблено кілька спроб комерціалізувати технологію плазмової утилізації відходів, але жодна з них поки що не досягла стадії комерціалізації. Проте це не зупиняє розвиток. Кореїнський інститут термоядерної енергетики, Hyundai Heavy Industries Power System Co., Ltd. і GS Engineering & Construction Co., Ltd. підписали угоду на розробку комерційної печі плазмової газифікації [26]. Відповідно до угоди три організації планують тісно співпрацювати в розробці технологій, дослідженнях і проектуванні систем плазмової газифікації, розробці та виробництві комерційного обладнання, а також розробці та впровадженню бізнесу для комерціалізації технології плазмової газифікації. Заплановано розробку та будівництво комерційного реактора, здатного вмщати 100 т відходів на день із плазмотроном потужністю 500 кВт, ґрунтуючись на своєму досвіді у виробництві промислових котлів із циркуляційним киплячим шаром.

Слід зазначити, що наразі не існує жодної установки комерційного виробництва H_2 з використанням технології плазмової газифікації біомаси. Необхідні значні дослідження для зниження енерговитрат і тим самим підвищення ефективності.

Загалом технологія виробництва водню шляхом газифікації біомаси ще не досягла високого рівня технологічної зрілості. Основна новизна цієї роботи полягає в оцінці сучасного стану технологій отримання H_2 з твердої біомаси з урахуванням технологічних, економічних та екологічних показників, а також технічного потенціалу виробництва водню шляхом плазмової газифікації біомаси. Згідно з оглядом літератури, нормовані витрати на виробництво водню можуть досягати в середньому 3,15 доларів США/кг H_2 , а середній вихід становить 0,1 кг H_2 /кг біомаси [27]. Водночас економічна доцільність отримання водню з біомаси може бути ускладнена високою вартістю, яка становить 1,21...2,42 \$/кг для газифікації та 1,21...2,19 \$/кг для піролізу. Збільшення виходу водню та вивчення методів зниження температури мають вирішальне значення для підвищення економічної життєздатності та стійкості газифікації біомаси для виробництва водню з особливою увагою до економії енергії [23].

Згідно з глобальним прогнозом з виробництва водню до 2050 р. [28] зелений водень на основі електроенергії, вироблений шляхом розщеплення води за допомогою електролізерів, передбачається домінуючою формою виробництва до середини століття. На його частку очікується 72 % вироб-

ництва. Для такого сценарію потрібен надлишок відновлюваної енергії для живлення електролізерів потужністю 3100 гігават. Це більш ніж удвічі перевищує загальну встановлену потужність сонячної та вітрової генерації на сьогодні. Благитний водень, вироблений із природного газу з уловлюванням викидів, відіграє велику роль у короткостроковій перспективі (близько 30 % від загального обсягу виробництва у 2030 р.), але його конкурентоспроможність буде знижуватися в міру збільшення потужностей відновлюваних джерел енергії та зниження цін. Проблема полягає в тому, щоб зробити водневі проєкти конкурентоспроможними та економічно вигідними на базі надлишку відновлюваної сонячної, вітрової енергії для живлення електролізерів, поки що залишається складною.

Риформінг природного газу, газифікація вугілля та електроліз води є перевіреними технологіями для виробництва водню сьогодні й застосовуються в промислових масштабах по всьому світу. Паровий риформінг природного газу є найчастіше використовуваним процесом у хімічній і нафтохімічній промисловості. Нині це найдешевший метод виробництва та має найнижчі викиди CO₂ серед усіх способів видобутку викопного палива. Електроліз води — це дорогий процес і його застосовують тільки в тому разі, якщо потрібен водень високої чистоти. При передбачуваному зростанні цін на природний газ і вугілля процес газифікації очікується найекономічнішим варіантом приблизно з 2030 р. Газифікація біомаси для отримання водню сьогодні все ще перебуває на ранній стадії, але, найімовірніше, стане найдешевшим варіантом поставок поновлюваного водню в майбутніх десятиліттях. Наразі газифікація біомаси застосовується на невеликих децентралізованих заводах на ранній стадії розгортання інфраструктури. Загалом структура виробництва водню дуже чутлива до специфіки країни і сильно залежить від передбачуваних цін на сировину; наявності ресурсів і політичної підтримки, яка також відіграє важливу роль, особливо для водню з відновлюваних джерел енергії та атомної енергії. Відновлюваний водень здебільшого є економічно вигідним варіантом у країнах із великою базою відновлювальних ресурсів та/або нестачею викопних ресурсів, для віддалених і малонаселених районів (наприклад, островів) або для зберігання надлишків електроенергії від нестабільних відновлювальних джерел енергії. В іншому разі відновлюваний водень має бути стимульованим або обов'язковим.

Очевидно, що в довгостроковій перспективі водень має вироблятися на основі процесів, які

дозволяють уникнути або мінімізувати викиди CO₂. Відновлюваний водень, одержуваний шляхом електролізу з енергії вітру чи сонця або з біомаси — це, безумовно, є кінцевою перспективою (особливо з погляду пом'якшення наслідків зміни клімату), але не є необхідною умовою для впровадження водню як енергетичного вектора. Поки ця мета не буде досягнута, водень, одержуваний з викопного палива, буде переважати, але вловлювання й зберігання CO₂, що утворюється, стає обов'язковою умовою для того, щоб водень сприяв загальному скороченню викидів CO₂ у транспортному секторі. Очікується переважання викопного водню в період приблизно до 2030 р., що відображено в різних водневих дорожніх картах, як і подальша роль поновлюваних джерел енергії. За винятком біомаси, питомі витрати на виробництво водню з відновлюваних джерел енергії не вважаються конкурентоспроможними порівняно з більшістю інших варіантів у цей період. Вартість виробництва водню значною мірою залежить від передбачуваних цін на сировину. Типовий діапазон цін до 2030 р. становить 8...12 центів/кВт·год (2,6...4,0 \$/кг). У довгостроковій перспективі до 2050 р., за очікуваного зростання цін на сировину (викопне паливо) і цін на викиди CO₂, витрати на виробництво водню також зростатимуть [29].

Виходячи з вищевикладеного, біомаса забезпечує відновлювану та стійку енергію в інших формах, таких як синтез-газ, біогаз та водень. Воднева енергетика має великий потенціал для декарбонізації різних секторів завдяки своїй універсальності. При цьому виробництво водневої енергії вважається екологічно чистим. Однак, незважаючи на те, що основні прекурсори для виробництва газоподібного водню легкодоступні в різних країнах, ці ресурси ще не використовуються, і, як наслідок, газоподібний водень не включено до енергобалансу держав [23].

Таким чином, сьогодні водень виробляють переважно з викопного палива (рис. 2) [30]. Вироб-

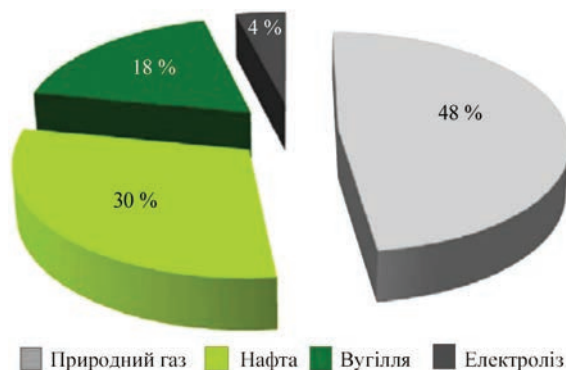


Рис. 2. Поточна сировина, що використовується для виробництва H₂ [30]

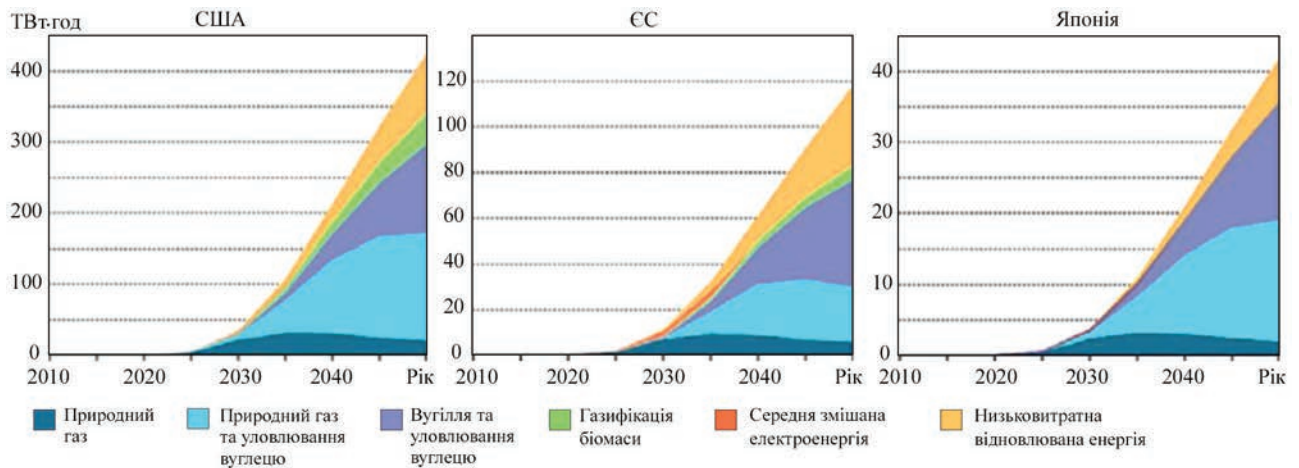


Рис. 3. Тенденції постачання водню [33]

ництво водню з біомаси шляхом газифікації може стати сприятливою альтернативою для майбутніх декарбонізованих застосувань, що ґрунтуються на відновлюваному та нейтральному по відношенню до діоксиду вуглецю водні.

Водночас слід зазначити, що на частку біомаси припадає близько 14 % від світового споживання енергії, що вище, ніж у вугілля (12 %), і можна порівняти з часткою газу (15 %) та електроенергії (14 %). Біомаса є основним джерелом енергії для багатьох країн, що розвиваються, але більша її частина некомерційна [31, 32].

Рис. 3 демонструє майбутню тенденцію поставок водню для трьох розвинених країн/регіонів — США, ЄС і Японії. Як бачимо, постачання водню значною мірою залежатиме від викопних джерел — природного газу та вугілля. Технології уловлювання та секвестрації вуглецю, як планується, відіграватимуть важливу роль у досягненні кліматичних цілей. Однак кількість водню, одержуваного з відновлюваних джерел, також має значно збільшитися. Стає зрозуміло, що поставки водню залежать від регіональних відмінностей у забезпеченості ресурсами. У той час як Японія включає відновлювану електроенергію тільки як

джерело відновлюваного водню, а ЄС і США планують збільшити виробництво водню шляхом газифікації біомаси [33].

Огляди сучасних можливих принципів промислового виробництва водню на основі газифікації біомаси представлено в численних роботах. Загалом водень із відновлюваних джерел може бути отриманий електрохімічним, біохімічним і термохімічним шляхом. Усі три способи дають змогу виробляти водень без викидів CO₂ (рис. 4). H₂@Scale — це ініціатива Міністерства енергетики США (DOE), яка об’єднує зацікавлені сторони для просування доступного водню, можливості отримання доходу в різних секторах енергетики. Вона охоплює проекти, що фінансуються Міністерством енергетики США, і заходи, які спільно фінансуються національними лабораторіями та промисловістю, для прискорення досліджень на ранніх стадіях розроблення та демонстрації водневих технологій.

У цьому дослідженні основна увага приділяється термохімічному підходу через газифікацію біомаси (деревної тріски, відходів сільського господарства). А саме, розглядається можливе промислове виробництво водню з упором на технології плазмової газифікації. На рис. 5 показано



Рис. 4. Бачення H₂@Scale отримання водню, у тому числі з відновлюваних джерел, та його використання



Рис. 5. Загальна технологічна схема виробництва водню шляхом плазмової газифікації

загальну схему процесу виробництва водню шляхом плазмової газифікації.

У схему включено очищення та збагачення газу, які необхідні для видалення CO і CO₂, а також таких слідових компонентів, як H₂S, HCl і легкої золи.

Існує низка відмінностей між характеристиками біомаси. Тверде паливо з біомаси, яке зазвичай використовують на великих електростанціях, включає сільськогосподарські відходи, енергетичні культури з короткою ротацією тощо. У їхньому складі помітно різняться пропорції легких речовин і фіксованого вуглецю. Більшість лігноцелюлозної біомаси (наприклад, деревні та трав'янисті матеріали) мають близько 75...85 % легких речовин і близько 15...17 % фіксованого вуглецю. За фізичними характеристиками, густиною та тепловими властивостями, біомаси значно різняться. Густина коливається в межах 200...300 кг/м³. Теплопровідність для частинок біомаси — від 0,05 Вт/(м·К) для деяких трав'янистих матеріалів і від 0,1 і 0,15 Вт/(м·К) для деревних матеріалів [34]. Майбутня промислова система газифікації, ймовірно, використовуватиме широкий спектр доступних ресурсів біомаси. Тому під час проектування необхідно буде враховувати змінюваність характеристик згоряння палива. Для забезпечення оптимальної ефективності необхідно керувати розміром частинок, прогнозувати поведінку неорганічних компонентів у реакторі, зокрема, ролі калію, що необхідно для ефективного управління обростанням і відкладенням золи тощо.

Плазмова газифікація містить послідовність фаз втрати маси твердої речовини, що включають сушіння, піроліз (вихід легких речовин), утворення та газифікацію деревного вугілля. Після чого відбувається гомогенне часткове окиснення легких речовин із наближенням до термодинамічної рівноваги та завершення реакції водяного зсуву. Окиснення як легких речовин, так і деревного вугілля відбувається за нестачі O₂ зі швидкістю, пропорційною доступному O₂ і температурі.

Плазмотрон є незалежним джерелом концентрованого тепла, що дає змогу регулювати температуру в реакторі незалежно від коливань якості сировини та подачі повітря/кисню/пари, необхідних для її газифікації. Оптимальні характеристики можуть бути встановлені та легко підтримуватися, і на них не впливає стан оброблюваного матеріалу. Це дає значні переваги в плані варіативності процесу порівняно з газифікацією без зовнішнього джерела тепла. Плазма може бути ефективно використана в кожній фазі процесу, забезпечуючи значне підвищення ефективності в рамках реалізації стратегії перетворення сировини в задані продукти газифікації. Однак переважне місце її використання впливає з логіки процесу.

Покажемо для оцінок є термічний аналіз втрати ваги, проведений для п'яти видів пелетного палива з біомаси, швидкість нагріву яких становить 20 °С/хв. Були отримані криві: термогравіметрична крива нагріву зразка — ТГ (рис. 6, а) і похідна термогравіметрична крива — ДТГ (рис. 6, б) [35].

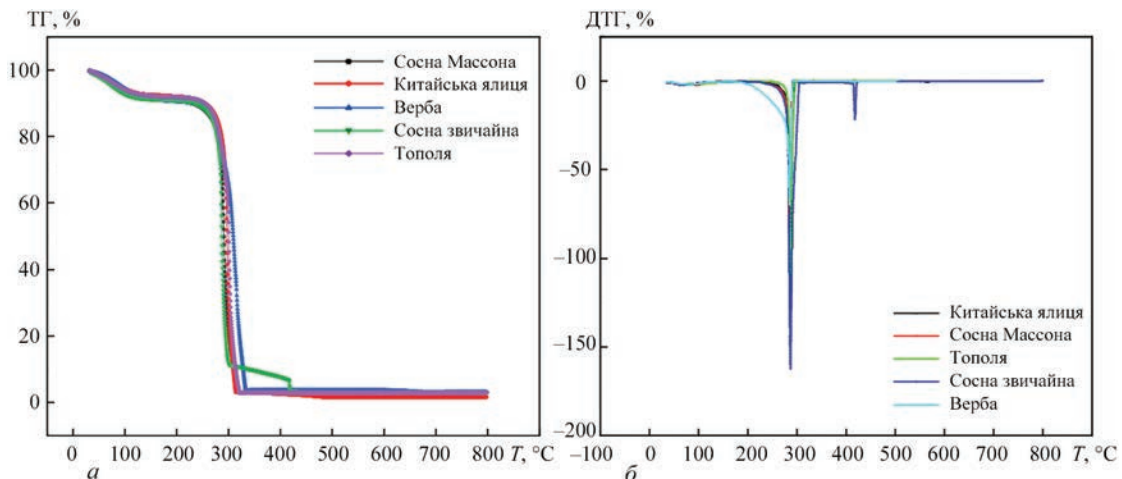


Рис. 6. Термічний аналіз втрати ваги палива з біомаси (проведено для п'яти видів пелетного палива з біомаси): а — ТГ криві; б — ДТГ криві [35]

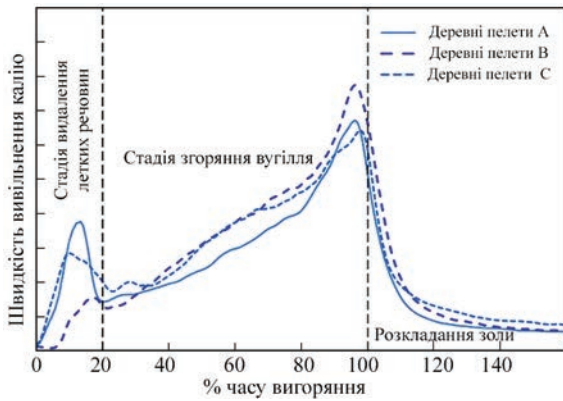


Рис. 7. Часові залежності вигорання трьох видів деревних пелет (А, В, С) з виділенням калію та зазначенням стадій газифікації [38]

З рис. 6 видно, що піроліз п'яти видів пелетного палива з біомаси здебільшого включає в себе три стадії: перша — стадія випаровування води; друга — стадія виходу легких речовин; третя — стадія окиснення фіксованого вуглецю. На першій стадії сушіння, від кімнатної температури до приблизно 170 °С, пікова температура втрати ваги відбувається за 100 °С, і втрата ваги на цій стадії становить близько 10 %. Під час процесу нагрівання пелети поглинають тепло для випаровування води (вільної, кристалічної, абсорбованої тощо). Це етап сушіння п'яти видів пелетного палива з біомаси, і при цьому його склад істотно не змінюється. Другий етап — вихід легких речовин за температури приблизно від 190...450 °С. Це стадія основної втрати ваги п'яти видів пелетного палива з біомаси та утворення початкового вуглецевого шару. Основними хімічними компонентами в п'яти видах пелетного палива з біомаси є целюлоза, геміцелюлоза, лігнін тощо. Втрата ваги на цій стадії становить близько 75 %. Третя стадія — після 450 °С, на якій відбувається повільне окиснення та розкладання вуглецевого шару. Втрата ваги на цій стадії становить близько 10 %. Піроліз органічної речовини в п'яти видах палива з гранул біомаси в основному завершено. Залишаються залишкова зола та інші нерозкладні речовини. Результати газифікації п'яти видів пелетного палива з біомаси приблизно однакові.

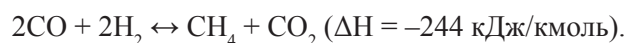
Для оптимізації процесу за продуктивністю та повнотою протікання реакцій важливим є визначення характеристик палива з точки зору вимірної тривалості різних етапів газифікації. Такі корисні дані для прогнозування поведінки при втраті маси для різних розмірів частинок дозволяють інформувати операторів щодо необхідності корегування вимог до подрібнення та температурного режиму. У роботі [36] наведено експериментальний метод дослідження тривалості різних стадій

згоряння окремих частинок стосовно трьох видів палива з деревної біомаси. Обсяг отриманих даних дає змогу оцінити емпіричні залежності між масою частинок і тривалістю виходу легких речовин, а також горіння деревного вугілля.

Температура згоряння біомаси на великих електростанціях сягає до 1600 К. Такі температури впливають на розділення неорганічних компонентів за допомогою фазових перетворень. Зокрема калій у паливі з біомаси може бути присутнім у різних видах і переходить у газову фазу під час згоряння за таких підвищених температур. Згодом продукти згоряння охолоджуються та конденсуються на поверхні печі й теплообмінників. А хлорид і гідроксид калію призводять до збільшення корозійних відкладень і налипання золи. Калій у газовій фазі також може призводити до утворення сульфатних аерозолів і повторно з'єднуватися з іншими твердофазними компонентами золи, впливаючи на поведінку золи під час плавлення і, отже, впливаючи на утворення нагару та шлаку в печі [37]. Картину вивільнення калію, отриману в експериментах під час вигорання різних видів палива з деревних гранул, показано на рис. 7 [38]. Ці дані дають змогу простежити фізичні механізми процесу та сприяють розробленню моделей газифікації частинок біомаси.

Як впливає з рис. 6, 7, лімітуючою стадією газифікації біомаси є газифікація вуглецевого шару. Оскільки автори розвивають тему генерування плазмової суміші водяної пари та кисню при атмосферного тиску з використанням безелектродного розряду для переробки біомаси з отриманням водню [39], то основну увагу слід приділити газифікації вуглецевого шару.

Для отримання збагаченого воднем синтез-газу переважними газифікуючими агентами є кисень і водяна пара [40]. Одним із ключових чинників, що впливають на продуктивність процесу, є співвідношення пари та кисню на вході в реактор. Як лабораторні, так і дані промислових тестів показують, що вище співвідношення пари та кисню також збільшує швидкість реакції зсуву водяного газу. У результаті впливу співвідношення пари та кисню на термодинамічні й кінетичні властивості процесу вищі значення дають вищу конверсію CO і менший вміст CO в газі на виході. Крім конверсії CO, співвідношення пари та кисню може також впливати на виробництво вуглеводнів (переважно метану) внаслідок реакції:



Для того щоб звести до мінімуму такі небажані реакції, слід забезпечити мінімальне співвідно-

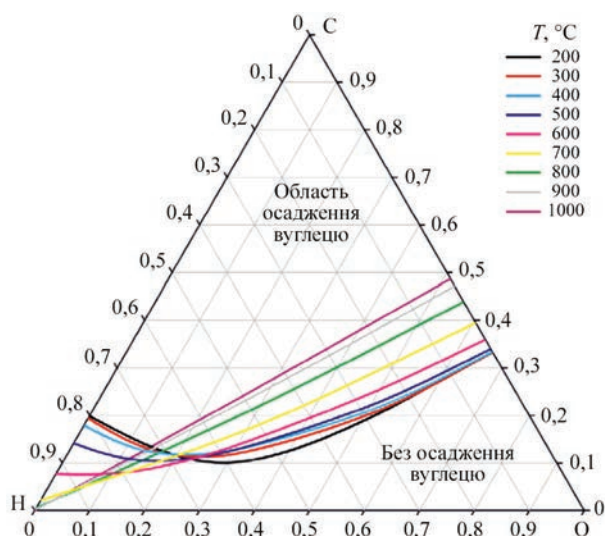
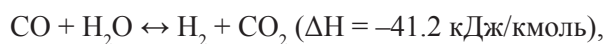


Рис. 8. Потрійна С–Н–О-діаграма для твердої фази всіх алотропів вуглецю при тиску 1 бар [41]

шення пари і кисню ~ 0,4 на вході в реактор. Крім того, певна кількість пари запобігає ризику коксування та відкладення вуглецю на поверхні. Залежно від подачі сировини в реактор, типове молярне співвідношення пари до кисню становить 0,6...2,2, а співвідношення пари до вуглецю — 2,8...4,2. На рис. 8 [41] показано потрійну С–Н–О-діаграму для тиску 1 бар, що вказує на зону з термодинамічною перевагою коксування та осадження вуглецю.

З метою збільшення виходу H_2 і зниження вмісту CO в синтез-газі, що генерується, реакція водяного зсуву:



є технологією, що добре зарекомендувала себе в промислових великотоннажних установках, які виробляють водень або встановлюють співвідношення CO/H_2 синтез-газу.

Реакція водяного зсуву перетворює окис вуглецю та пару на водень і вуглекислий газ. Константа рівноваги зменшується з температурою, тому ви-

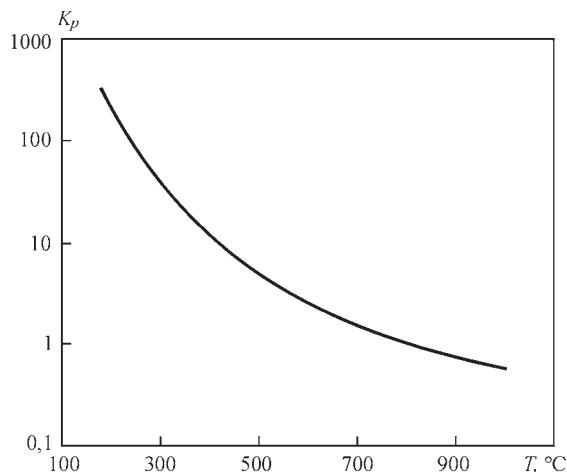


Рис. 9. Зміна константи рівноваги (K_p) для реакції зсуву водних газів у залежності від температури [42]

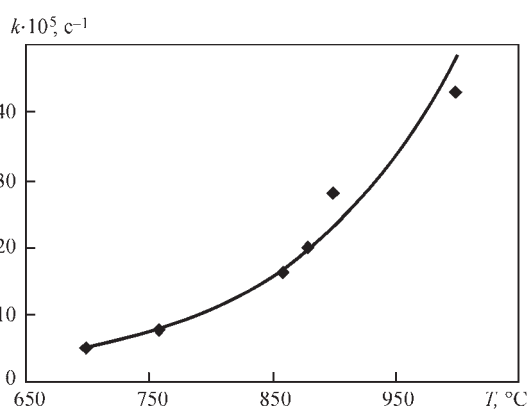


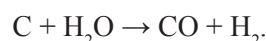
Рис. 10. Вплив температури в шарі сировини на швидкість конверсії вуглецю [43]

соким конверсіям сприяють низькі температури, як показано на рис. 9 [42].

При використанні перегрітої водяної пари як теплоносія та реагенту для конверсії вуглецю зі збільшенням його температури швидкість конверсії збільшується (рис. 10) [43].

Це цілком узгоджується з уявленнями про термічну активацію хімічних процесів — зі збільшенням температури їхня швидкість збільшується, а збільшення температури забезпечується збільшенням температури водяної пари, тобто зі збільшенням температури пари зростають швидкість конверсії та глибина протікання реакцій. На рис. 11 [43] наведено характерні результати дослідження кінетики газовиділення в процесі газифікації карбонізованого вугілля.

Основний процес взаємодії вуглецю з водяною парою:



При розгляді залежностей на рис. 11 звертає на себе увагу наступне. У процесі газифікації відбувається зниження концентрації водню за одночасного збільшення вмісту в суміші кисню. При цьому співвідношення концентрацій CO і CO_2

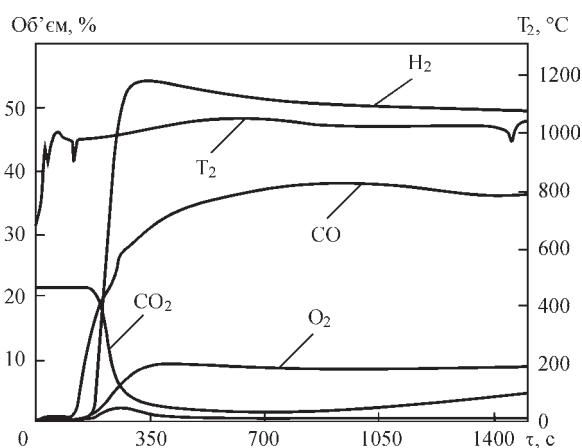
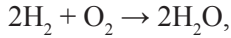


Рис. 11. Залежності виходу газоподібних продуктів газифікації вугілля від часу

практично не змінюється протягом усього процесу. Зменшення кількості водню в продуктах реакції відбувається внаслідок окиснення його киснем за реакцією:



і при цьому використовується кисень, одержуваний за реакцією $\text{CO}_2 \rightarrow \text{C} + \text{O}_2$. Власне ж ця реакція стає можливою, з одного боку, завдяки окисненню CO , перегрітою водяною парою $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$, з іншого, за наявності у вугіллі мінеральних домішок, що мають каталітичну активність щодо реакції $\text{CO}_2 \rightarrow \text{C} + \text{O}_2$ [44].

Виходячи з вищевикладеної оцінки стану питання газифікації біомаси у великих об'ємах, проєкція на плазмові технології сьогодні виглядає наступним чином. Протягом десятиліть плазма була визнана ефективним методом знищення небезпечних відходів. Проте генератори плазми споживають багато електроенергії. У результаті зростаюча вартість електроенергії та забруднення навколишнього середовища від вугільних електростанцій зробили плазму дорогим і екологічно сумнівним методом утилізації. До 2000 р. більша частина досліджень у сфері застосування плазми для переробки відходів була спрямована на досягнення — наскільки це можливо — повного піролітичного розкладання. Однак, чим досконаліший процес, тим більша споживана потужність. Навіть за великих обсягів знищених відходів піролітична газифікація потребує набагато більше енергії, ніж виробляє. Тільки коли вартість усунення небезпеки, яку становлять собою відходи, дуже висока, плазма стає економічно вигідним методом знищення відходів [45]. У даний час індустрія термічної обробки уважно вивчає способи аналізу та оптимізації ефективності установок [46, 47]. Проведено аналіз чутливості робочих параметрів процесу плазмової газифікації з метою максимізації чистої виробленої енергії та мінімізації витрат на установку. Для розрахунку капітальних і експлуатаційних витрат процесу використовувалися кореляції з літератури, а також ринкові дані, якщо такі були. Наприклад, у Греції було проведено тематичне дослідження установки плазмової газифікації, яка переробляє 750 т твердих побутових відходів на добу. Результати цього аналізу показали, що вартість процесу плазмової газифікації порівнянна з процесом спалювання, що зазвичай використовується. Крім того, плазмова газифікація дала кращий еколого-технічний результат [46]. Цей факт пропонує нові підстави для перегляду історичних питань вартості та енергоспоживання, які раніше обмежували розвиток плазмового оброблення. Щоб конкурувати з технологіями, заснованими на викопному паливі, великомасштабні установки газифікації все ще потребують значного технологічного розвитку, підтримуваного економічними субсидіями та стимулами, ефективними операційними стратегіями, а також глобальною політикою, що вимагає прийняття вуглецево-нейтральних рішень. У [48] показано, що питомі інвестиції мають тенденцію до зменшення з роками, зокрема для установок газифікації, призначених для виробництва електроенергії, когенераційної енергії та рідкого біопалива (рис. 12).

Незважаючи на те, що плазмова газифікація має безліч переваг, є й недоліки, які необхідно враховувати, перш ніж інвестувати в цю технологію. Одним з основних недоліків плазмової газифікації є висока вартість. Цей процес вимагає коштовного обладнання та навченого персоналу, що може зробити його непомерно дорогим для багатьох приватних осіб та організацій. Крім того, висока вартість плазмової газифікації може ускладнити виправдання витрат, особливо коли доступні дешевші методи. Ще одним недоліком плазмової газифікації є те, що вона потребує спеціалізованої підготовки. Особи, які бажають виконати цю процедуру, повинні пройти глибоке навчання, щоб навчитися безпечно й ефективно працювати зі спеціальним обладнанням. Але загалом плазмова газифікація пропонує багатообіцяюче рішення для зниження залежності від традиційних методів управління відходами й водночас допомагає їм стати більш екологічними. Як і будь-яка інша технологія або процес, у цього методу є як переваги, так і недоліки, які необхідно враховувати. Перед тими, хто збирається використовувати плазму для переробки відходів, стоїть завдання домогтися низького енергоспоживання, високої енергетичної цінності газу, низьких капітальних і експлуатаційних витрат і тривалого часу роботи обладнання.

Виходячи з вищевикладеної оцінки стану питання газифікації біомаси у великих об'ємах, проєкція на плазмові технології сьогодні виглядає наступним чином. Протягом десятиліть плазма була визнана ефективним методом знищення небезпечних відходів. Проте генератори плазми споживають багато електроенергії. У результаті зростаюча вартість електроенергії та забруднення навколишнього середовища від вугільних електростанцій зробили плазму дорогим і екологічно сумнівним методом утилізації. До 2000 р. більша частина досліджень у сфері застосування плазми для переробки відходів була спрямована на досягнення — наскільки це можливо — повного піролітичного розкладання. Однак, чим досконаліший процес, тим більша споживана потужність. Навіть за великих обсягів знищених відходів піролітична газифікація потребує набагато більше енергії, ніж виробляє. Тільки коли вартість усунення небезпеки, яку становлять собою відходи, дуже висока, плазма стає економічно вигідним методом знищення відходів [45]. У даний час індустрія термічної обробки уважно вивчає способи аналізу та оптимізації ефективності установок [46, 47]. Проведено аналіз чутливості робочих параметрів процесу плазмової газифікації з метою максимізації чистої виробленої енергії та мінімізації витрат на установку. Для розрахунку капітальних і експлуатаційних витрат процесу використовувалися кореляції з літератури, а також ринкові дані, якщо такі були. Наприклад, у Греції було проведено тематичне дослідження установки плазмової газифікації, яка переробляє 750 т твердих побутових відходів на добу. Результати цього аналізу показали, що вартість процесу плазмової газифікації порівнянна з процесом спалювання, що зазвичай використовується. Крім того, плазмова газифікація дала кращий еколого-технічний результат [46]. Цей факт пропонує нові підстави для перегляду історичних питань вартості та енергоспоживання, які раніше обмежували розвиток плазмового оброблення. Щоб конкурувати з технологіями, заснованими на викопному паливі, великомасштабні установки газифікації все ще потребують значного технологічного розвитку, підтримуваного економічними субсидіями та стимулами, ефективними операційними стратегіями, а також глобальною політикою, що вимагає прийняття вуглецево-нейтральних рішень. У [48] показано, що питомі інвестиції мають тенденцію до зменшення з роками, зокрема для установок газифікації, призначених для виробництва електроенергії, когенераційної енергії та рідкого біопалива (рис. 12).

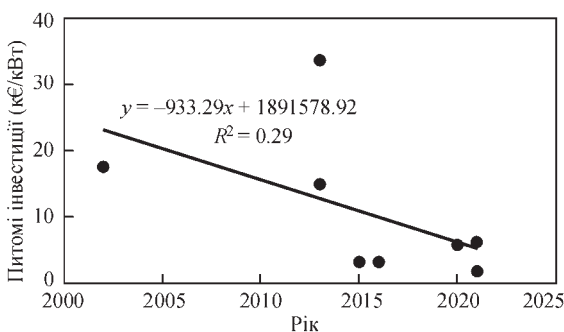


Рис. 12. Інвестиції за роками, а також відповідне лінійне рівняння регресії для електроенергії, когенераційних установок і установок газифікації біопалива [48]



Рис. 13. Високочастотні індукційні плазмотрони: *a* — Tekna (40...200 кВт); *б* — JEOL

Щодо виконання вимоги до тривалого часу роботи наразі розглядаються можливості використання мікрохвильової [49] та індукційної плазми [50]. Поява нових плазмових технологій у методах термохімічної конверсії може запропонувати нові шляхи до економічного виробництва H_2 і продуктів з доданою вартістю. Плазмова газифікація досі розроблялася на комерційній основі, як правило, з використанням технології плазмового розряду постійного струму [51]. Проте пальники постійного струму мають короткий термін служби електродів у присутності окислювальних газів, що призводить до незручностей та високих експлуатаційних витрат, пов'язаних з їх заміною. Альтернативою є використання безелектродних плазмотронів.

Для переробки відходів у невеликих і промислових масштабах розглядаються три різні типи передових технологій термічної плазми, такі як атмосферні плазмотрони постійного струму, радіочастотні та мікрохвильові плазмотрони. Авторами роботи [52] було проведено порівняльне дослідження всіх трьох плазмових пальників для використання в енергетиці та переробці відходів. Було наведено імітаційне моделювання та експериментальні результати з плазмотроном постійного струму непрямої дії та високочастотним індукційним плазмотроном. Результати засвідчують, що плазмотрони постійного струму та високочастотні індукційні плазмотрони економічні й вигідні для великомасштабного перероблення відходів та отримання енергії. Водночас при переробці відходів у невеликих масштабах можна використовувати мікрохвильовий плазмовий пальник. Загалом мінімізація впливу на навколишнє середовище та економічність процесу є найважливішими параметрами для підвищення доцільності та стійкості використання установок з переробки відходів при використанні плазми.

Високочастотні індукційні плазмотрони з потужністю в плазмі 15...200 кВт розраховані на

більш ніж 10 000 год безупинної роботи [53]. Вони застосовуються в хімічній і металургійній промисловості завдяки високій надійності та тривалому терміну роботи без заміни деталей (протягом 2–3 місяців).

Сучасні високочастотні індукційні плазмотрони компаній TEKNA [54] і JEOL [55] (рис. 13) досягли високого рівня досконалості та задовольняють вимогам для системи плазмової газифікації.

Для адекватного управління процесами газифікації, розроблення та оптимізації плазмових реакторів необхідно мати достовірну інформацію про ВЧ розряд і параметри плазмового факела. При газифікації біомаси завдання спрощується, оскільки струменевий індукційний плазмотрон працює тривалий час на одному режимі. Протяжний ламінарний факел оптимізованого індукційного плазмотрона має добре заповнені профілі температур і швидкостей (рис. 14) [56]. Слід зазначити, що було проведено безліч досліджень, присвячених температурі та швидкості струменя індукційних плазмотронів шляхом прямих вимірів, за допомогою зондів і оптичних емісійних спектрів. Для наочності тут наведено розрахункову картину температурних і швидкісних полів у факелі індукційного плазмотрона, яка узгоджується з експериментальними даними.

Факел змодельовано в ANSYS Fluent, геометрія була об'єднана в сітку для дискретизації простору. Дослідження незалежності сітки проводилося шляхом уточнення розміру комірки, яка відображається як кількість комірок на міліметр осьової відстані.

Високочастотні індукційні (ВЧІ) плазмотрони використовуються в промисловості для широкого спектра застосувань. Щоб отримати більше користі, було зроблено безліч спроб поліпшити індукційний плазмотрон, що включало в себе оптимізацію умов його експлуатації, розміру та форми. Однак зроблені спроби [57–59] щодо оптимізації

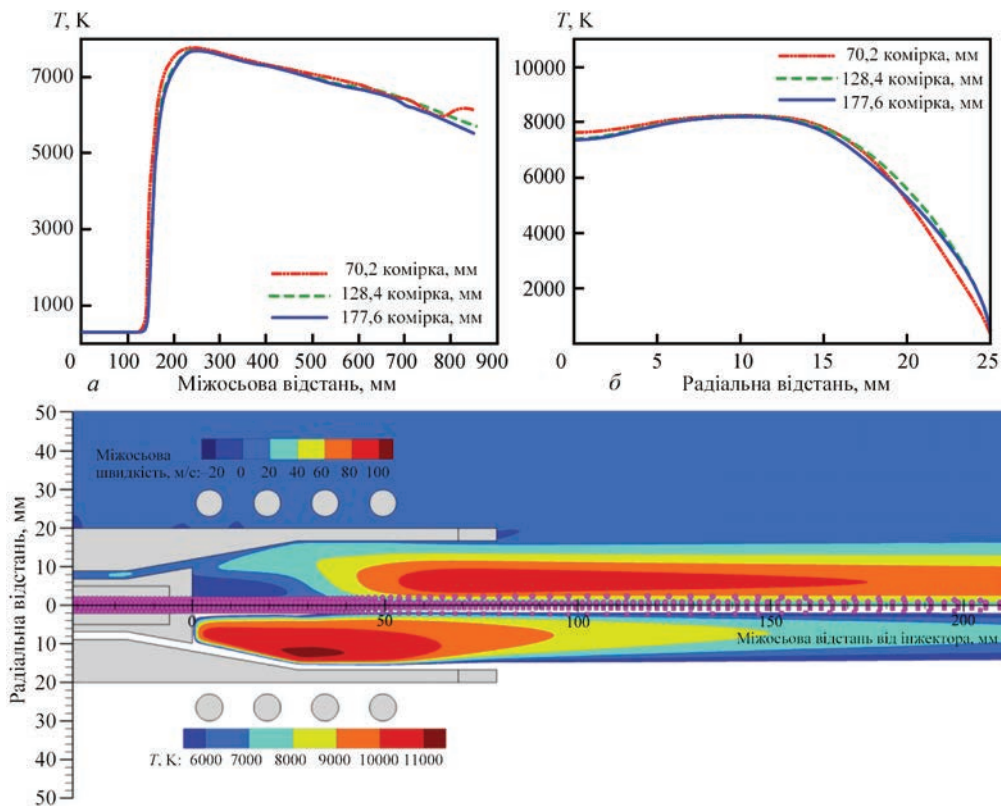


Рис. 14. Розподіл параметрів у факелі звичайного високочастотного індукційного плазмотрона: *a* — температура вздовж центральної осі для різних розмірів комірок; *b* — радіальний розподіл температури на виході плазмотрона для комірок різних розмірів; *c* — контури осьової швидкості та температури

не давали довготривалих результатів, залишивши первісний дизайн, запропонований Рідом [60] у 1960-х роках, який практично не змінився. Проте недавні зусилля [61] відродилися та розвинулися в [56]. Істотне поліпшення досягається за рахунок використання конічної геометрії (рис. 13, *b*). Було встановлено, що така геометрія призвела до значного зниження споживання газу й електроенергії та поліпшення характеристик. Наведені на рис. 13 спеціальні ВЧ-плазмотрони доступні для роботи з кожним класом ВЧ джерел електроживлення. Вони мають високоефективну конструкцію для отримання максимального ефекту термічного плазмового оброблення, чудову міцність і стабільність. Використовується двотрубна система водяного охолодження: внутрішня трубка виготовлена з кераміки з вищою міцністю, ніж кварцова трубка, що забезпечує стабільну роботу протягом тривалого часу за атмосферного тиску в умовах надвисоких температур і середовищ з високим ступенем окиснення, таких як HCl, HF або HBr.

У перші роки дослідження ВЧ плазми експериментатори користувалися доступними джерелами електроживлення (ламповими генераторами), і перші результати були отримані в широкому діапазоні частот 0,5...60 МГц. Пізніше було встановлено стандартний ряд частот 0,44; 1,76; 5,28 МГц і коливальних потужностей лампових генераторів

60, 160, 1000 кВт [62]. Найважливіший споживач енергії — це генераторна лампа. Втрати енергії на аноді генераторної лампи складають 25...33 % від усієї споживаної електроенергії, саме ця обставина визначає всю енергетику ВЧ плазмових установок. Оптимальною частотою для ВЧ-плазмотронів вважається 5,28 МГц і вище, втрати в металевому плазмотроні становлять 1,3 % від споживаної потужності. Частота 1,76 МГц з точки зору використання металевого плазмотрона вважається граничною, нижче за яку спускатися не слід — втрати становлять уже 4...6 %. На частоті 0,44 МГц втрати в плазмотроні, індукторі та контурах сумарно стають рівними втратам у генераторній лампі. Загальний ККД ВЧ плазмової установки на генераторній лампі на частоті 1,76...5,28 МГц становить 60...64 %.

Високочастотні індукційні плазмотрони, які дійсно можуть стати основною ланкою технологічного процесу в даний час, з потужністю плазми 15...200 кВт, розраховані на більш ніж 10000 годин неперервної роботи. Стратегія полягає в тому, щоб об'єднати газифікацію та максимальне очищення газу в одному реакторі для отримання високої якості та теплоти згоряння синтез-газу. Рекуперація енергії та поєднання первинного очищення з газифікацією роблять систему більш компактною, зменшують втрати тепла та займають менше місця

на виробництві. Підвищення чистоти газу, що виходить із системи газифікації біомаси, виключення смоляних забруднень, максимальне зниження лужних металів, твердих частинок, азоту (N_2), сірки (S) і хлору (Cl) спрощують фільтрацію й очищення з мінімізацією використання каталізаторів і сорбентів.

Нова концепція організації технологічного процесу та будівництва реактора з використанням індукційної плазми забезпечує рівномірний газодинамічний режим по всьому об'єму зони газифікації та ефективну й рівномірну теплову дію на весь об'єм твердого вуглецевмісного матеріалу та газової фази в зоні газифікації, а відтак рівномірний розподіл температури й концентрацій у зоні газифікації. Це сприяє створенню однорідних умов для хімічних реакцій як у твердому вуглецевмісному матеріалі, так і в газовій фазі, а також стабільний склад і високі енергетичні показники отримання синтез-газу з максимальним наближенням до термодинамічної рівноваги [50]. Очікується надрівноважний нагрів поверхні від струменя високоентальпійної дисоційованої газової суміші індукційного плазмотрона [63]. Ефект надрівноважного нагріву спостерігається під час обтікання дисоційованим хімічно нерівноважним газовим потоком, що генерується індукційним плазмотроном, поверхні з неоднорідними каталітичними властивостями. Під час переходу від некаталітичної ділянки поверхні до каталітичної відбувається стрибок теплового потоку та температури до рівнів, що суттєво перевищують значення, які отримано на повністю каталітичній поверхні або у випадку рівноважного пограничного шару. Ефект зумовлений тим, що за однакових зовнішніх умов течії концентрації атомів дисоційованого газу в пограничному шарі на некаталітичній поверхні вищі, ніж у випадку каталітичної поверхні, і їхня рекомбінація далі по потоку на каталітичній поверхні призводить до її додаткового нагрівання. В експериментах зі зразком, ділянки якого були вкриті хромонікелевою шпінеллю, температура за лінією переходу від низько- до висококаталітичної ділянки поверхні перевищувала температуру, виміряну в тій самій ділянці під час обтікання повністю висококаталітичної поверхні, на величину $140\text{ }^\circ\text{C}$ [64]. У дозвукових струменях дисоційованого повітря на плоскій висококаталітичній поверхні реалізовано теплові потоки густиною $150\text{...}3750\text{ кВт/м}^2$. Урахування цього явища є особливо важливим на етапі газифікації твердого вуглецю, змішаного із зольним залишком.

Ключовим питанням при масштабуванні плазмової газифікації біомаси є питома енерговитрати

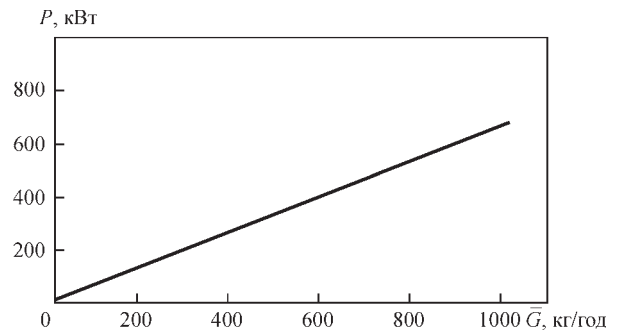


Рис. Взаємозв'язок продуктивності процесу газифікації відходів і потужності стороннього джерела енергії [65]

електроенергії на кілограм відходів. Наведемо низку показових процесів. Розрахунки процесів плазмової газифікації відходів у шахтному реакторі дали змогу оцінити енерговитрати та окреслити шляхи їх зниження [65]. На рис. 15 наведено залежність продуктивності процесу газифікації середньостатистичного складу відходів від потужності стороннього джерела енергії. Теплота згоряння перебувала в межах $7\text{...}10\text{ МДж/кг}$ за масової частки вуглецю і водню у вихідній сировині $20\text{...}30\%$. Для порівняння теплота згоряння біомаси лушпиння соняшника становить $19,4\text{ МДж/кг}$ за масової частки вуглецю та водню 54% . У шахтній плазмовій печі, для якої отримано залежність (рис. 15), в якості окиснювача використовується волога, що визначає вихідну вологість сировини, а плазмотрони можуть працювати з подачею перегрітої пари або повітря, кисень якого є лише додатковим окисником у процесі газифікації. Для обраної схеми печі зі збільшенням температури в реакторі відбувається збільшення витрат електричної енергії, але на таку саму величину зростає потенційна енергія синтез-газу: при збільшенні температури з 1100 до $1300\text{ }^\circ\text{C}$ вміст водню в сухому синтез-газі знижується з $57,5$ до 57% , а вміст CO збільшується з 34 до $36,5\%$. Тут потрібна масова витрата окиснювача, що не перевищує $5\text{...}7\%$ від масової витрати одержуваного синтез-газу. Витрата електричної енергії — від $0,68\text{ кВт}\cdot\text{год/кг}$ (вологість близька до нуля) до $1,5\text{ кВт}\cdot\text{год/кг}$ (вологість $0,15\text{ г/кг}$). Основний висновок полягає в тому, що новим технологіям перероблення вуглецевмісних відходів, що прийняті до реалізації, слід базуватись на використанні в якості окиснювача кисню та перегрітої водяної пари до температур $> 1000\text{ }^\circ\text{C}$.

Нові технології мають здійснюватися в слабоокиснювальній і відновлювальній атмосферах і мати дві розділені у просторі зони: середньотемпературну зону ($T < 1000\text{ }^\circ\text{C}$) для сушіння, піролізу та газифікації, і високотемпературну зону ($T > 1300\text{ }^\circ\text{C}$) для завершення процесів газифі-

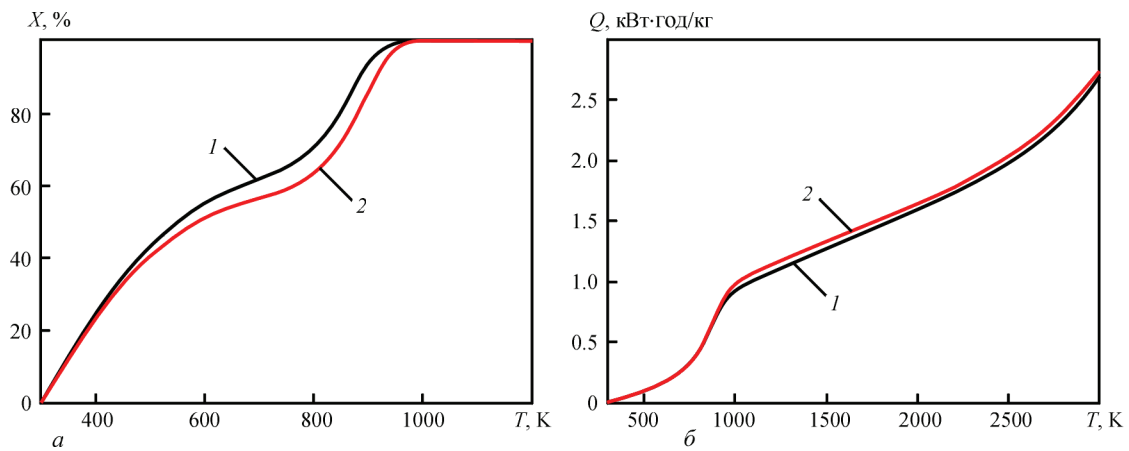


Рис. 16. Залежність ступеня газифікації (а) та енергоспоживання плазми (б) при газифікації біомаси (гною) від температури: 1 — плазмова газифікація; 2 — плазмовий піроліз [66]

кації, видалення неорганічної частини відходів і нагріву газоподібного продукту (синтез-газу) до оптимальної температури.

У роботі [66] аналізується використання плазмової технології для переробки біомаси (БМ) у вигляді змішаного гною тварин великої рогатої худоби, коней, овець, кіз і свиней (вміст вологи 30 %). Характерний склад біомаси (гною) виглядає таким чином в мас. %: H_2O — 30; С — 29,07; Н — 4,06; О — 32,08; S — 0,26; N — 1,22; P_2O_5 — 0,61; K_2O — 1,47; CaO — 0,86; MgO — 0,37. Переважна частина органічної речовини складається з целюлози ($(C_6H_{10}O_5)_n$) і містить трохи органічної сірки (S). БМ на 95,21 % складається з органічної речовини, вміст мінеральної речовини 4,79 %. Біомаса має теплоту згоряння 16 МДж/кг. Для плазмової газифікації та піролізу використовували такі суміші за масою: 100 % БМ + 25 % повітря та 100 % БМ + 25 % азоту відповідно. Проведено експериментальні дослідження плазмово-хімічної газифікації та піролізу БМ на установці, основними елементами якої були плазмотрон постійного струму (номінальна потужність 70 кВт) і плазмово-хімічний реактор продуктивністю БМ близько 50 кг/год. Ступінь газифікації та питоме енергоспоживання плазми наведені на рис. 16.

З рис. 16 видно, що ступінь газифікації збільшувався з підвищенням температури в обох випадках, але за газифікації це було трохи швидше, ніж за піролізу. Однак за температури 950 К ступінь газифікації сягнув 100 % для обох процесів. Під час порівняння показників процесу плазмової обробки БМ розрахункові та експериментальні дані показали задовільну відповідність, розбіжність не більше 16 %. Продукти БМ, які оброблені плазмою, виявилися вільними від шкідливих домішок як у розрахунках, так і в експериментах, що підтверджує екологічні переваги плазмової обробки. Використовуючи коефіцієнти ексергії теплоти

згоряння біомаси, зроблено висновок, що плазмова газифікація біомаси на 25 % ефективніша, ніж традиційне спалювання.

Визначено можливість газифікації деревних гранул до синтез-газу в середовищі термічної повітряної плазми [67]. Аналізувався вплив потужності плазмотрона, витрати плазмоутворюючого газу та коефіцієнта еквівалентності на газифікацію біомаси. Вихід синтез-газу варіювався від 59,95 до 62,51 %, а співвідношення H_2/CO — від 0,68 до 0,8. Найбільші концентрації H_2 і CO в отриманому газі склали 26,6 і 33,35 % відповідно, що давало співвідношення H_2/CO — 0,8. Нижча теплотворна здатність отриманого синтез-газу варіювалася від 7,62 до 8,82 МДж/нм³. Коефіцієнти конверсії вуглецю та енергії становили 85,3...97,2 % і 29,23...30,57 % відповідно. Питомі енерговитрати варіювалися в діапазоні 165,47...195,61 кДж/моль синтез-газу. При цьому питома витрата електроенергії на газифікацію деревних відходів і ефективність газифікації склали 2,49 кВт·ч/кг і 82 % відповідно. Окрім того, оцінка енергетичного та масового балансу засвідчила, що за умови газифікації 20,73 кг/год деревних гранул отриманий синтез-газ може виробити 15...18 кВт·год і 111...114 кВт·год електричної та теплової енергії відповідно.

Із трьох досліджених біомас [68] (цукрової макухи, рисового лушпиння та тирси) тирса є найзручнішою для процесу отримання синтез-газу, багатою на водень, оскільки з неї можна отримати більше водню (~ 97 г/кг біомаси). Але при цьому потребує більшого споживання електроенергії плазмовими пальниками (2,23 кВт·год/кг біомаси). У цьому сенсі рисове лушпиння показує найгірші результати з максимальним питомим виробництвом водню 54 г/кг біомаси при 27,5 кВт·год/кг виробленого водню. Як остаточний висновок, дане дослідження підтвердило, що плазмову газифікацію із сумішшю

повітря та пари як агента, що газифікує, можна використати для виробництва газу, багатого воднем, із питомим виробництвом у діапазоні 1,79...2,80; 1,68...2,37 та 2,09...2,81 $\text{нм}^3/\text{кг}$ із цукрової макухи, рисового лушпиння та тирси відповідно, і при цьому з нижчим споживанням електроенергії на кілограм водню, ніж при водному гідролізі.

Плазмові струмені при атмосферному тиску є основним інструментом для газифікації. Підраховано, що плазмотрон споживає лише 2...5 % від загального обсягу енергії, що надходить до системи газифікації, і до 80 % від загального обсягу енергії, що надходить у сировину, може бути відновлене у виробленому синтез-газі. У 2010 р. наукові системи сертифікації (SCS) повідомили, що процес плазмової газифікації призвів до найнижчих викидів парникових газів при тому ж обсязі енергії. При цьому приблизно на 31 мільйон тонн менше еквівалента $\text{CO}_2/\text{МВт}\cdot\text{год}$ порівняно зі сміттєзвалищем, з рекуперацією енергії та приблизно на 50000 тонн менше еквівалента $\text{CO}_2/\text{МВт}\cdot\text{год}$ порівняно зі спалюванням природного газу [69]. Разом з тим, виходячи з вищезазначених результатів і цілей сталого розвитку енергетики, інтеграція високоєфективних газифікаторів біомаси будь-якого типу в передові системи виробництва відбуватиметься на майбутньому світовому енергетичному ринку на порівняльній основі. Останніми роками виробники докладають численних зусиль для зниження вартості впровадження газифікаторів на біомасі. Основною гальмівною причиною є вища вартість придбання плазмового обладнання в пропонованому циклі порівняно з традиційними процесами, а також використання складного обладнання. У даному дослідженні оцінюється місце вдосконаленого плазмового циклу для виробництва енергоносіїв з високою потужністю та ефективністю. Зниження вартості обладнання безпосередньо пов'язане зі зниженням споживання електроенергії плазмовими пальниками ($\text{кВт}\cdot\text{год}/\text{кг}$ біомаси) при збереженні показників ефективності. Зниження загального енергоспоживання системи може бути досягнуто за рахунок оптимізації потоків енергії в реакторі газифікації — мінімізації вільної енергії Гіббса [70] і використанні плазми не тільки як додаткового джерела тепла, а і для локального стимулювання хімічних реакцій у зоні надрівноважного нагріву. Необхідно врахувати наступне.

1. Температура синтез-газу, що відходить, висока — $1000\text{ }^\circ\text{C}$ і вище, і є багато можливостей для утилізації відпрацьованого тепла на додачу до введення енергії плазми та часткового спалювання матеріалу відходів. Авторами було проведено

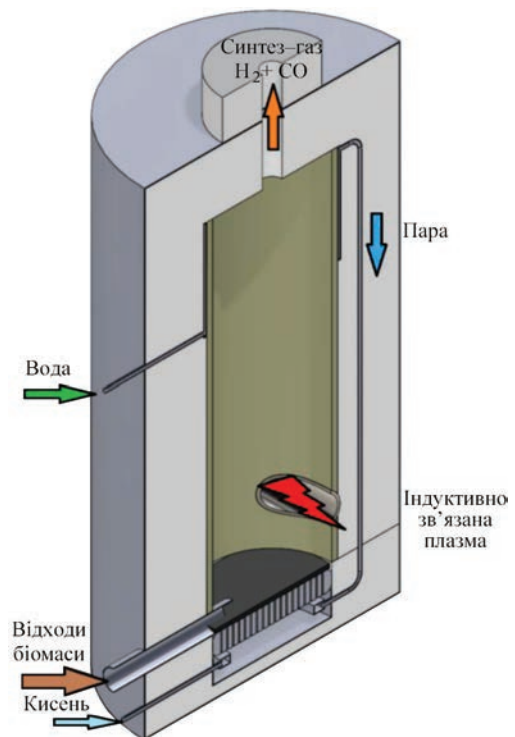


Рис. 17. Схема реактора, прийнятого для моделювання

енергетичну оптимізацію системи газифікації біомаси з використанням високотемпературного синтез-газу, що відходить, для попереднього нагрівання вхідної водяної пари.

2. Використання ВЧІ плазми підвищеного об'єму (рис. 14) збільшує ефективну площу, доступну для взаємодії з поверхнями.

3. Використання ВЧІ плазми для локального надрівноважного нагрівання та стимулювання хімічних реакцій. Схему реактора, прийнятого для моделювання, наведено на рис. 17.

Виконання цих умов створює передумови для зниження встановленої потужності плазмового обладнання з відповідним зниженням вагогабаритних показників і вартості. Як правило, обладнання ВЧІ плазми містить у собі джерело живлення (радіочастотний генератор і узгоджувальну мережу), плазмотрон і реактор. Більшість процесів, заснованих на ВЧІ плазмі, використовують рівноважну плазму в діапазоні температур $8000\text{...}12000\text{ K}$. Щодо комерційного застосування ВЧІ плазми до теперішнього часу, то в основному це обробка порошків і космічні дослідження, а також деякі екологічні додатки: дисоціація хлористого водню, обробка медичних відходів [71], розкладання полівінілхлориду [72]. ВЧІ плазма при низьких тисках тут не розглядається, тільки термічна плазма з високою ентальпією. Для газифікації біомаси та переробки відходів ВЧІ метод важливий для отримання термічної плазми з високою температурою газу при високих тисках. Існують і потребують

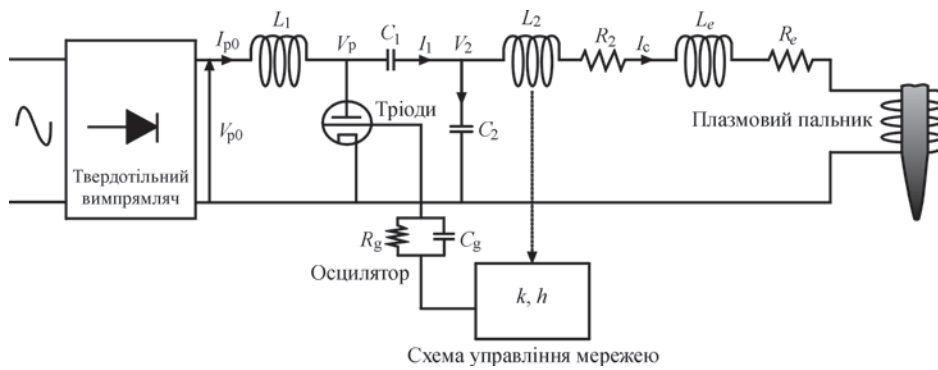


Схема управління мережею

Рис. 18. Типова структурна електрична схема джерела живлення ВЧІ-плазмотрона на генераторній лампі [59, 73]

подальшого вивчення та опрацювання кілька проблем, такі як збудження ВЧІ плазмового розряду за атмосферного тиску та ефективність джерел ВЧІ живлення. Вони сьогодні базуються на генераторній лампі в електричній схемі силової електроніки (рис. 18) [59, 61, 73]. Загальні проблеми під час генерації плазми: розмір — ВЧІ-генераторів, вони зазвичай є великими, важкими блоками; надійність — у генераторах використовуються лампи з обмеженим ресурсом; ефективність — генератори із силовою лампою завжди були неефективними. Причинами є: втрати потужності — переважна частина потужності розсіювалася на лампі; невисока надійність — у генераторах, які використовують силові лампи, відбувається їхня заміна приблизно кожні два роки, залежно від використання; у генераторі присутня висока напруга близько 10 кВ, що збільшує ймовірність невдачі; проблеми в обслуговуванні — генератори є складними елементами, які потребують трудомістких процедур для ремонту, якщо трапляється збій у роботі. У переважній частині сучасних плазмових ВЧІ-генераторів починають використовуватися твердотільні електронні компоненти. Це значно зменшує розміри

сучасних плазмових генераторів і набагато більше підходить для експлуатації. ВЧІ-генератори, що мають ККД 90 % і вище, нині успішно використовуються при низькому тиску та малій потужності плазмотронів. Твердотільні ВЧІ-генератори (на кшталт рис. 19) високої потужності (> 25 кВт) перебувають у стадії розроблення.

На рис. 19 показано електричний ланцюг твердотільного джерела живлення для ВЧІ-плазмотрона [74]. Блок живлення складається з чотирьох основних частин: випрямна схема, ізолюваний затвор, біполярний транзистор IGBT, ланцюг преривача перетворювача постійного струму, ланцюг повномостового інвертора MOSFET і ланцюг узгодження імпедансу з узгоджувальним трансформатором і ланцюгом серії LC. Частота інвертора MOSFET регулюється в межах 350...450 кГц за допомогою керування фазовим автопідстроюванням частоти для узгодження імпедансу навантаження. Ця частота 350...450 кГц набагато менша, ніж та, яка використовується у ВЧІ-плазмотронах. У даному випадку електромагнітне поле нижчої частоти реалізує більшу глибину скін-шару в плазмі, що допомагає підтримувати великий обсяг плазми.

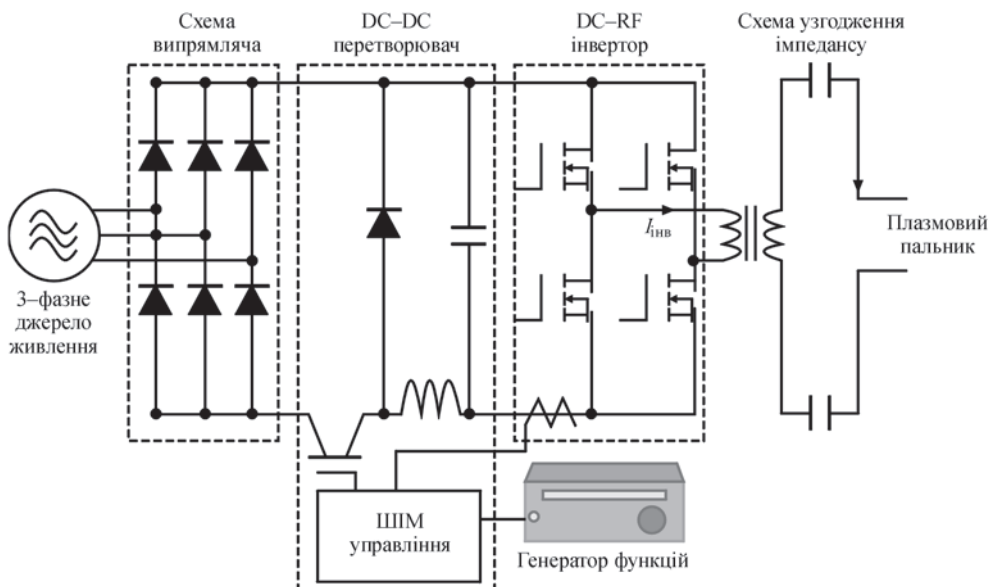


Рис. 19. Схема твердотільного ВЧІ-генератора для живлення плазмотрона [74]

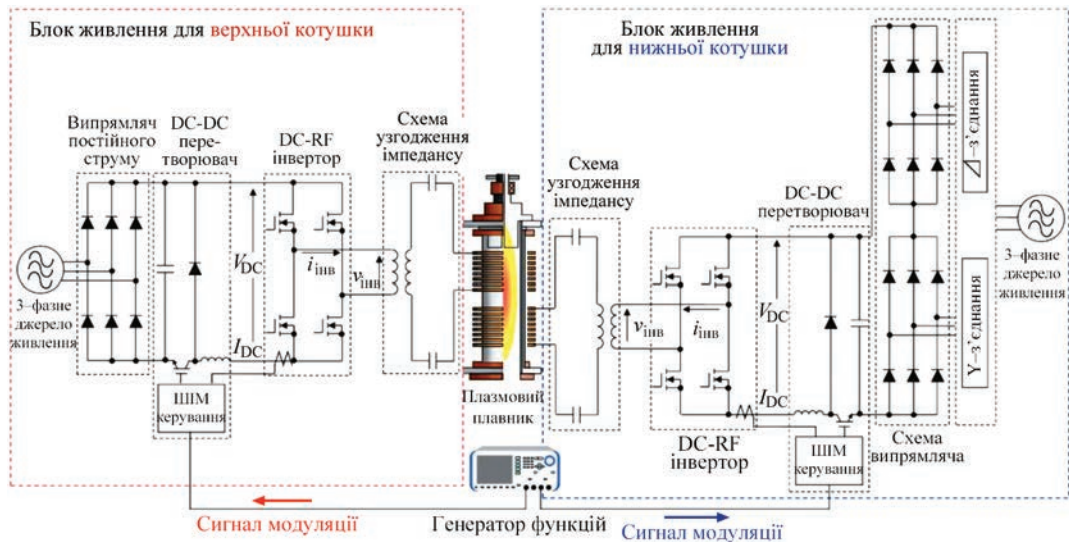


Рис. 20. Індукційна термоплазмова система тандемного типу

Крім того, прийняття цієї нижчої частоти дозволяє використовувати енергію MOSFET із низькою вартістю. В експериментах було підтверджено, що загальна ефективність перетворення енергії цього джерела живлення вища за 95 % для всіх випадків. Такий вищий коефіцієнт перетворення енергії є перевагою використання напівпровідників для підтримання потужної ВЧІ плазми. Вхідна потужність постійного струму була зафіксована на рівні 10 кВт.

Сучасні потужні 13,56 або 27,12 МГц, 120 кВт, 50 Ом генератори з кварцевим приводом [75] на генераторній лампі все ж таки мають низьку енергоефективність, значні габарити та вартість, тому транзисторні підсилювачі розглядаються як джерело живлення наступного покоління ВЧІ-джерел. Переваги порівняно з ламповими генераторами: вищий ККД (90 % і вище), менша вартість, схемні спрощення з меншими вимогами до охолодження та завдяки перевіреним надійності плюс чудові характеристики роблять твердотільні підсилювачі дуже привабливим варіантом для наступного покоління джерел живлення [76]. Хоча це й вагомні аргументи, проте твердотільний генератор має бути експериментально підтверджений практичним досвідом роботи з плазмовими пристроями. Протягом багатьох років твердотільні генератори замінили лампові генератори в галузі радіомовлення. Переваги використання таких грамотно спроектованих серійних виробів для електропостачання плазмових джерел мають потенційно вищу надійність і нижчі витрати порівняно з ламповими.

Підвищення потужності досягається комбінуванням. Випробуваний твердотільний генератор складається з 50 модулів максимальною потужністю кожен 1,5 кВт. Кожен модуль комутується чотирма транзисторами. Отримані прямокутні хвилі розташовуються паралельно на «суматорно-

му» феритовому осерді, а потім перетворюються на синусоїдальну хвилю за допомогою вихідного фільтра. Навіть якщо один або кілька модулів вийдуть з ладу, генератор все одно буде працездатним, хоча й при меншій максимальній вихідній потужності. Модуль може бути замінений за короткий час, що підвищує надійність і ремонтпридатність системи порівняно з ламповими генераторами, що самозбуджуються. На відміну від лампових генераторів, усередині твердотільного генератора немає високої напруги і, отже, немає накопиченої енергії, яку потрібно видаляти під час швидкого вимкнення. Модульна концепція та відсутність високої напруги — ще одна причина розраховувати на високу надійність.

Для масштабування плазмової газифікації генератори повинні мати максимальну вихідну потужність до 200 кВт для того, щоб забезпечити достатній запас потужності. Для індуктивно зв'язаної плазми більшість сучасних твердотільних систем забезпечують ККД близько 70...75 %, тобто 70...75 % споживаної потужності фактично надходить у плазму.

Підвищення потужності для твердотільних генераторів може бути також досягнуто на базі нової індукційної термоплазмової системи тандемного типу з використанням двох джерел ВЧІ живлення і двох котушок індукторів для одного плазмотрона (рис. 20) [77].

В ITER-India Institute for Plasma Research розроблено та випробувано 40 кВт, 1 МГц твердотільне високочастотне джерело живлення з індуктивно зв'язаною плазмою [78]. Джерело потужністю 40 кВт було розроблено шляхом конфігурування кількох мостових інверторних модулів із використанням комутаційних напівпровідників останнього покоління, магнітних

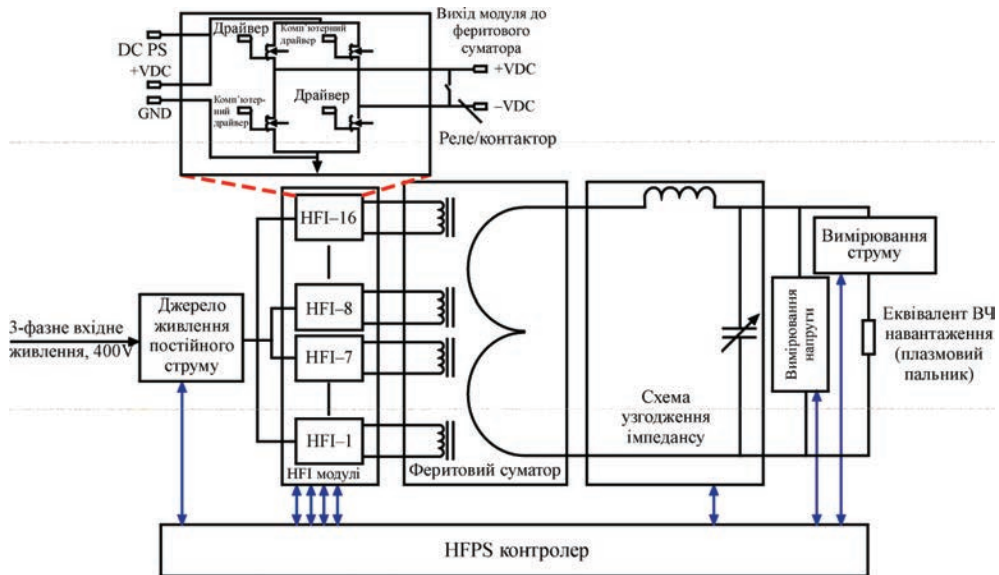


Рис. 21. Схема 40 кВт твердотільного джерела живлення індукційного плазмотрона

суматорів і LC-налаштування мережі, для забезпечення синусоїдального виходу 1 МГц при стандартному навантаженні 50 Ом (рис. 21). Досвід роботи з 40 кВт гемофільтрацією великого обсягу (HVHF) забезпечує значне розуміння реальних сценаріїв роботи в поєднанні з джерелами плазми на основі радіочастот. Це має стати основою для наступного кроку — розроблення джерела потужністю 200 кВт.

Завдання підвищення енергоефективності генераторів індукційної плазми цілком здійсненне через енергоефективну перетворювальну техніку, основою якої є електронна компонентна база силової електроніки на основі широкозонних напівпровідників. Основні напівпровідникові матеріали для силової електроніки — Si, GaAs, SiC, GaN. Усі сучасні успіхи в потужній і надпотужній електроніці асоціюються з кремнієвими ізольованими біполярними транзисторами (IGBT). Є можливість створення IGBT-приладів на основі GaAs, SiC і GaN [79]. При розробленні силових електронних перетворювачів для генераторів плазми прагнуть досягнення високої ефективності і водночас високої густини потужності. Збільшення частоти комутації ставлять нові завдання, оскільки комутаційні втрати пропорційні частоті перемикання, що обмежує ефективність системи за високих частот. Водночас багато стандартів висувають жорсткіші вимоги до ефективності системи. Що стосується робочої частоти, то більшість конструкцій на основі кремнію сьогодні працюють на частоті 60...300 кГц. Якщо частота перемикання 500 кГц або вище, це може бути досягнуто тільки за допомогою GaN. SiC зазвичай розраховані на робочу напругу 650...1200 В і вище. На рис. 22 наведено

діаграму залежності потужності від частоти різних пристроїв з їх застосуванням [80].

За прогнозами, у найближчі п'ять років використання карбіду кремнію в силовій електроніці зростатиме й становитиме найбільший ринок широкосмугової електроенергетики, за ним слідує нітрид галію (з урахуванням потужності та затребуваних ВЧ пристроїв). SiC сприяє підвищенню напруги, що витримується, і потужності, в той час як GaN сприяє використанню вищої частоти, що розширює сфери застосування силових пристроїв, зокрема в бік створення генераторів ВЧІ плазми.

Завдання полягає в тому, щоб оперативно переносити новітні результати досліджень у складне виробництво. До теперішнього часу запит на силову електроніку для плазмової інженерії переважно був пов'язаний з вакуумною технікою тонких плівок, травлення. Джерела ВЧІ плазми почали досліджуватися наприкінці 1990-х років, зрештою, стали широко використовуватися у виробництві напівпровідників [82, 83]. У серійному виробництві випускаються твердотільні апарати типу Vacuum Power Plasma Supply (RF) 6 кВт, 13,56 МГц [84]. Подальший розвиток потужних ВЧІ плазмових генераторів можливий у різних напрямках, зокрема як технології космічних двигунів. Представлено експериментальні результати для потужного (до 180 кВт) індуктивного плазмового генератора з високим тепловим ККД до 84 % при збудженні плазми в молекулярних газах [85].

Наразі технології в галузі твердотільних пристроїв силової електроніки перебувають у швидкому розвитку. Нові моделі являють собою інноваційні пристрої, що використовують хороші властивості матеріалів з широкою забороненою

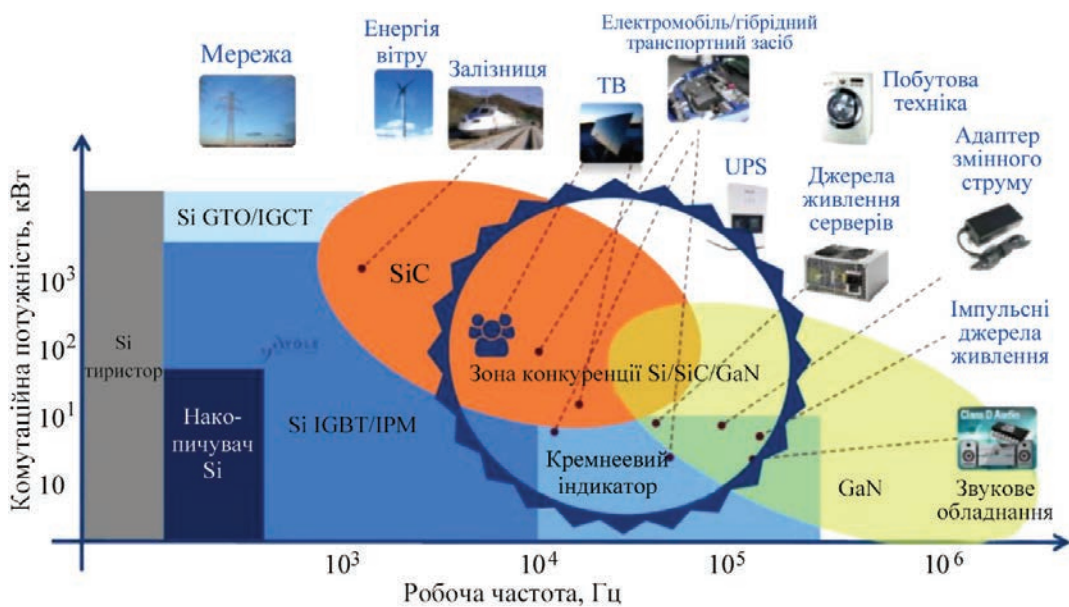


Рис. 22. Діаграма залежності потужності від частоти та сфери застосування силових пристроїв [80, 81]

зоною, таких як карбід кремнію і арсенід галію. Промислові та академічні дослідницькі інтереси зосереджені на розробці добре зарекомендованих і нових силових пристроїв, спрямованих на отримання хорошої продуктивності та підвищеної економії енергії, з наголосом на найважливіші аспекти й проблеми, які необхідно розв'язати, на думку авторів, для повної реалізації парадигми — досконалішого перероблення відходів у корисні продукти.

Висновки

У даній статті наведено позитивні аргументи щодо плазмової газифікації біомаси як перспективної, життєздатної та економічно вигідної технології. Показано, що процес не обмежується якою-небудь конкретною сировиною та конкретним продуктом, але є гнучким по відношенню до переробки відходів біомаси, які можуть бути токсичними або забрудненими, для створення корисних продуктів.

Проаналізовано вплив різних параметрів плазмової газифікації на властивості та вихід синтез-газу з метою сприяння оптимізації майбутніх досліджень та процесу в цілому. Показано, що плазмова газифікація може бути ефективним способом перетворення, у тому, числі токсичної та вологої біомаси у збагачений воднем синтез-газ, щоб зробити процес газифікації чистішим та працювати з вищою ефективністю. Газифікація загалом має низку негативних соціальних та екологічних наслідків впливу, які можуть бути зведені до мінімуму за рахунок відповідної плазмової технологічної реалізації.

Внаслідок багаторічної експлуатації плазма визнана ефективним методом знищення небезпечних відходів. Однак плазмові установки коштовні та використовують багато електроенергії. У статті показано нові технологічні рішення цих проблем за рахунок оптимізації потоків енергії в реакторі газифікації, раціонального використання плазми як концентрованого потоку енергії, зниження споживання електроенергії плазмовими пальниками, зменшення потужності та вартості плазмових установок, радикального вирішення проблеми їх надійності.

Як видно з проведеного дослідження, плазмова газифікація біомаси має переваги в порівнянні з традиційними варіантами отримання збагаченого воднем синтез-газу. Щодо економічної перспективи, то в новому підході при будівництві великотоннажного виробництва очікуються нижчі капітальні та експлуатаційні витрати.

Список літератури/References

1. Sikarwar, V.S., Zhao, M., Clough, P. et al. (2016) An overview of advances in biomass gasification. *Energy & Environmental Sci.*, 9(10), 2927–3304. DOI: <https://doi.org/10.1039/c6ee00935b>
2. *World Energy Outlook 2015*. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/5a314029-69c2-42a9-98ac-d1c5deeb59b3/WE02015.pdf>
3. Song, H., Yang, G., Xue, P. et al. (2022) Recent development of biomass gasification for H2 rich gas production. *Applications in Energy and Combustion Sci.*, 10, 100059. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2022.100059>
4. de Lasa, H., Salaices, E., Mazumder, J., Lucky, R. (2011) Catalytic steam gasification of biomass: Catalysts, thermodynamics and kinetics. *Chemical Reviews*, 111(9), 5404–5433. DOI: <https://doi.org/10.1021/cr200024w>

5. Nipattumakul, N., Ahmed, I.I., Gupta, A.K., Kerdsuwan, S. (2011) Hydrogen and syngas yield from residual branches of oil palm tree using steam gasification. *Inter. J. of Hydrogen Energy*, 36(6), 3835–3843. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.04.102>
6. Dincer, I. (2012) Green methods for hydrogen production. *Inter. J. of Hydrogen Energy*, 37(2), 1954–1971. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.03.173>
7. Franco, C., Pinto, F., Gulyurtlu, I., Cabrita, I. (2003) The study of reactions influencing the biomass steam gasification process. *Fuel*, 82(7), 835–842. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(02\)00313-7](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(02)00313-7)
8. Larsson, A., Kuba, M., Vilches, T.B. et al. (2021) Steam gasification of biomass — Typical gas quality and operational strategies derived from industrial-scale plants. *Fuel Proc. Technol.*, 212, 106609. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106609>
9. Khan, M.J., Al-Attab, K.A. (2022) Steam gasification of biomass for hydrogen production — A review and outlook. *J. of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sci.*, 98(2), 175–204. DOI: <https://doi.org/10.37934/arfmts.98.2.175204>
10. Henriksen, U., Ahrenfeldt, J., Jensen, T.K. et al. (2006) The design, construction and operation of a 75 kW two-stage gasifier. *Energy*, 31(10–11), 1542–1553. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.05.031>
11. Trippe, F., Fröhling, M., Schultmann, F. et al. (2011) Techno-economic assessment of gasification as a process step within biomass-to-liquid (BtL) fuel and chemicals production. *Fuel Proc. Technol.*, 92(11), 2169–2184. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.06.026>
12. Hasler, P., Nussbaumer, Th. (1999) Gas cleaning for IC engine applications from fixed bed biomass gasification. *Biomass and Bioenergy*, 16(6), 385–395. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(99\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(99)00018-5)
13. Asadullah, M. (2014) Barriers of commercial power generation using biomass gasification gas: A review. *Renewable and Sustainable Energy Rev.*, 29, 201–215. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.074>
14. Petrov, S.V., Katircioğlu, T.Y. (2020) *Technological aspects of steam and water plasma*. OmniSkriptum Publishing Group.
15. Zhang, Q., Dor, L., Fenigshstein, D. et al. (2011) Gasification of municipal solid waste in the plasma gasification melting process. *Applied Energy*, 90(1), 106–112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.01.041>
16. Sanjaya, E., Abbas, A. (2023) Plasma gasification as an alternative energy-from-waste (EFW) technology for the circular economy: An environmental review. *Resources, Conservation and Recycling*, 189, 106730. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106730>
17. (2008) Independent waste technology report. The alter NRG/WESTINGHOUSE plasma gasification process. http://energy.cleartheair.org.hk/wp-content/uploads/2013/09/Westinghouse_Plasma_Gasification.pdf
18. Hrabovsky, M. (2011) Thermal plasma gasification of biomass. In: *Progress in Biomass and Bioenergy Production*. DOI: <https://doi.org/10.5772/18234>
19. Lopez, G., Artetxe, M., Amutio, M. et al. (2018) Recent advances in the gasification of waste plastics. A critical overview. *Renewable and Sustainable Energy Rev.*, 82(1), 576–596. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.032>
20. Hlina, M., Hrabovsky, M., Kavka, Konrad, T.M. (2014) Production of high quality syngas from argon/water plasma gasification of biomass and waste. *Waste Management*, 34(1), 63–66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.09.018>
21. Tamošiūnas, A., Valatkevičius, P., Valinčius, V., Levinskas, R. (2016) Biomass conversion to hydrogen-rich synthesis fuels using water steam plasma. *Comptes Rendus. Chimie. Inter. Renewable Energy Congress*, 19(4), 433–440. DOI: [10.1016/j.crci.2015.12.002](https://doi.org/10.1016/j.crci.2015.12.002)
22. Zhovtyanskij, V., Ostapchuk, M. (2022) Plasma technologies in the problem of producing “more than green hydrogen”. *Gorenie i Plazmohimiya*, 20(1), 11–32. DOI: <https://doi.org/10.18321/cpc478>
23. Obiora, N.K., Ujah, C.O., Asadu, C.O. et al. (2024) Production of hydrogen energy from biomass: Prospects and challenges. *Green Technol. and Sustainability*, 2(3), 100100 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.grets.2024.100100>
24. Nagar, V., Kaushal, R. (2024) A review of recent advancement in plasma gasification: A promising solution for waste management and energy production. *Inter. J. of Hydrogen Energy*, 77(5), 405–419. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.06.180>
25. (2015) «World’s largest» gasification plant nears completion. Ed. by T. Goulding. <https://www.letsrecycle.com/news/worlds-largest-gasification-plant-nears-completion/>
26. *Development of a commercial reactor for high-temperature plasma gasification of waste*. <https://www.inews24.com/view/1469770>
27. Borges, P.T., Lora, E.E.S., Venturini, O.J. et al. (2024) A comprehensive technical, environmental, economic, and biometric assessment of hydrogen production through biomass gasification, including global and brazilian potentials. *Sustainability*, 16(21), 9213. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16219213>
28. DNV Report: *Hydrogen Forecast to 2050*. https://aben.com.br/wp-content/uploads/2022/06/DNV_Hydrogen_Report_2022_Highres_single1.pdf
29. Ball, M., Wietschel, M. (2009) The future of hydrogen-opportunities and challenges. *Inter. J. of Hydrogen Energy*, 34, 615–627. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.11.014>
30. Arregi, A., Amutio, M., Lopez, G. et al. (2018) Evaluation of thermochemical routes for hydrogen production from biomass: A review. *Energy Conversion and Management*, 165, 696–719. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.089>
31. *Oregon. Biomass energy*. <http://www.oregon.gov/ENERGfi/RENEW/Biomass/>
32. Demirbas, A. (2005) Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues. *Progress in Energy and Combustion Sci.*, 31(2), 171–192. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2005.02.002>
33. (2015) *IEA. Technology roadmap — Hydrogen and fuel cells*. <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-hydrogen-and-fuel-cells>
34. *Phyllis — database for biomass and waste*. <https://www.fao.org/4/y0909e/y0909e09.htm>
35. Jia, G. (2021) Combustion characteristics and kinetic analysis of biomass pellet fuel using thermogravimetric analysis. *Processes*, 9(5), 868. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr9050868>
36. Mason, P.E., Darvell, L.I., Jones, J.M. et al. (2015) Single particle flame-combustion studies on solid biomass fuels. *Fuel*, 151, 21–30. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.11.088>
37. Bryers, R.W. (1996) Fireside slagging, fouling, and high temperature corrosion of heat-transfer surface due to impurities in steam-raising fuels. *Progress in Energy and Combustion Sci.*, 22, (1), 29–120. DOI: [https://doi.org/10.1016/0360-1285\(95\)00012-7](https://doi.org/10.1016/0360-1285(95)00012-7)
38. Mason, P.E., Riaza, J., Chalmers, H. et al. (2016) Biomass fuel flexibility in future conventional power generation. In:

- Proc. of 5th IET Inter. Conf. on Renewable Power Generation 2016*. DOI: <https://doi.org/10.1049/cp.2016.0559>
39. Petrov, S., Stukhlyak, P., Bondarenko, S. et al. (2024) Steam plasma gasification of biomass using electrodeless plasmatrons. *The Paton Welding J.*, **6**, 20–28. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2024.06>
 40. Sidek, F.N., Abdul Samad, N.A.F, Saleh, S. (2020) Review on effects of gasifying agents, temperature and equivalence ratio in biomass gasification process. In: *Proc. of IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, Kuantan, 1–2 October 2019*, 012028. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/863/1/012028>
 41. Jaworski, Z., Zakrzewska, B., Pianko-Oprych, P. (2017) On thermodynamic equilibrium of carbon deposition from gaseous C–H–O mixtures: Updating for nanotubes. *Rev. in Chemical Eng.*, **33(3)**, 217–235. DOI: <https://doi.org/doi:10.1515/revce-2016-0022>
 42. Liu, K., Song, C., Subramani, V. (2010) Hydrogen and syngas production and purification technologies. *Wiley, Hoboken, New Jersey*, **533**. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470561256>
 43. Kagakin, E.I., Bogomolov, A.R., Shevryev, S.A., Pribaturin, N.A. (2013) Interaction of carbonized coal with superheated water vapor. *Polzunovskij Vestnik*, **1**, 135–138.
 44. Balat, M. (2008) Hydrogen-rich gas production from biomass via pyrolysis and gasification processes and effects of catalyst on hydrogen yield. *Energy Sources, Pt A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, **30**, 552–554. DOI: <https://doi.org/10.1080/15567030600817191>
 45. (2006) *Plasma progress: Low-cost operation and clean energy at long last?* <https://waste-management-world.com/artikel/plasma-progress-low-cost-operation-and-clean-energy-at-long-last>
 46. Zitouni, A., Voutsas, E. (2021) Modeling, optimization and cost analysis of municipal solid waste treatment with plasma gasification. *Environmental Proc.*, **8**, 747–767. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40710-021-00518-y>
 47. Mayoko, J.C., Lee, B., Nyazabe, S. et al. (2023) Plasma gasification, an eco-friendly solution for power generation and MSW treatment in Kinshasa, DR Congo. *Open Access Library J.*, **10(12)**. DOI: <https://doi.org/10.4236/oalib.1110424>
 48. Lourinho, G., Alves, O., Garcia, B. et al. (2023) Costs of gasification technologies for energy and fuel production: Overview, analysis, and numerical estimation. *Recycling*, **8(3)**, 49. DOI: <https://doi.org/10.3390/recycling8030049>
 49. Panicker, P.K., Magid, A. (2016) Microwave plasma gasification for the restoration of urban rivers and lakes, and the elimination of oceanic garbage patches. In: *Proc. of 10th Inter. Conf. on Energy Sustainability Collocated with the ASME 2016 Power Conf. and the ASME 2016 14th Inter. Conf. on Fuel Cell Science, Engineering and Technology, June 26–30, 2016, Charlotte, North Carolina, USA*. ES2016-59632, V001T02A011; 14. DOI: <https://doi.org/10.1115/ES2016-59632>
 50. *Industrial microwave generators for next generation waste gasification*. <https://rfhic.com/case-studies/industrial-microwave-generators-for-waste-gasification-applications/>
 51. Petrov, S.V., Zhovtyansky, V.A. (2019) *Energy efficient steam-plasma technologies for waste processing*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
 52. Gabbar, H.A., Darda, S.A., Damideh, V. et al. (2021) Comparative study of atmospheric pressure DC, RF, and microwave thermal plasma torches for waste to energy applications. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, **47**, 101447. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101447>
 53. *Applied plasma technologies. More products: Plasma torches*. <https://www.plasmacombustion.com/product-torches.html>
 54. Leblanc, D., Dolbec, R., Guerfi, A. et al. (2017) Silicon nanopowder synthesis by inductively coupled plasma as anode for high-energy Li-ion batteries: Arrays, functional materials, and industrial nanosilicon. In: *Silicon Nanomaterials Sourcebook*, 463–484. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315153551-24>
 55. *JEOL. TP series. RF induction thermal plasma. Products*. <https://www.jeol.com/products/industrial/eb/TPseries.php>
 56. Mirek, P. (2019) *Novel industrial scale radio frequency inductively coupled plasma torch. Master of applied science*. Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Toronto. <https://utoronto.scholaris.ca/server/api/core/bitstreams/b3fe4d3a-233b-421f-a5f3-8c36491dec3a/content>
 57. Strelko, O., Berdnychenko, Y., Pylypchuk, O. et al. (2021) Historical milestones in the development and creation of radio frequency inductively coupled plasma torches. In: *Proc. of Inter. 3rd Ukraine Conf. on Electrical and Computer Engineering, 26–28 August 2021*. DOI: <https://doi.org/10.1109/UKRCON53503.2021.9575482>
 58. Bottin, B., Chazot, O., Carbonaro, M. et al. (2000) The VKI plasmatron characteristics and performance. *72 Chaussee de Waterloo B-1640 Rhode-Saint-Genese, Belgium*. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADP010745.pdf>
 59. Merkhouf, A., Boulos, M.I. (1998) Integrated model for the radio frequency induction plasma torch and power supply system. *Plasma Sources Sci. and Technology*, **7(4)**, 599. DOI: <https://doi.org/10.1088/0963-0252/7/4/017>
 60. Reed, T.B. (1961) Induction-coupled plasma torch. *J. of Applied Physics*, **32(5)**, 821–824. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1736112>
 61. Alavi, S., Khayamian, T., Mostaghimi, J. (2017) Conical torch: The next-generation inductively coupled plasma source for spectrochemical analysis. *Analytical Chemistry*, **90(5)**, 3036–3044. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/acs.analchem.7b04356>
 62. Boulos, M.I., Fauchais, P., Pfender, E. (2016) *Inductively coupled radio frequency plasma torches: Handbook of Thermal Plasmas*. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-12183-3_17-1
 63. Chung, P.M., Liu, S.W., Mirels, H. (1963) Effect of discontinuity of surface catalytic on boundary layer flow of dissociated gas. *Inter. J. of Heat and Mass Transfer*, **6(3)**, 193–210. DOI: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(63\)90106-6](https://doi.org/10.1016/0017-9310(63)90106-6)
 64. Chazot, O., Panerai, F., Muylaert, J.M., Thoemel, J. (2010) Catalysis phenomena determination in plasmatron facility for flight experiment design (Invited). In: *Proc. of 48th Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 04–07 January, 2010 Orlando, Florida*. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2010-1248>
 65. Danilenko, A.A. (2012) *Experimental and theoretical studies of plasma gasification processes of carbon-containing technogenic waste: Syn. of Thesis for Cand. of Tech. Sci. Degree*. Novosibirsk, 21.
 66. Messerle, V.E., Ustimenko, A.B., Lavrichshev, O.A., Nugman, M.K. (2024) The gasification and pyrolysis of biomass using a plasma system. *Energies*, **17(22)**, 5594. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17225594>
 67. Aikas, M., Gimžauskaitė, D., Tamošiūnas, A. et al. (2024) Thermal arc air plasma application for biomass (wood pellets) gasification. *Clean Technol. and Environmental Policy*, **26(1)**, 31–43. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10098-023-02566-4>
 68. Tamayo-Pacheco, J.J., Peña-Pupo, L., Vázquez-Peña, A., Brito-Sauvanell, Á.L. (2020) Hydrogen-rich syngas production by plasma gasification of existing biomasses in Cuba. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, **29(4)**, 53–63. <https://go.gale.com/ps/i.do?p=IFME&u=anon~f-3c66468&id=GALE%7CA652867273&v=2.1&it=r&sid=googleScholar&asid=628dc909>

69. ISC3. International Sustainable Chemistry Collaborative Centre. <https://www.isc3.org/page/best-practice-detail/plasma-gasification>
70. Yao, S., Zhang, Y., Xia, J. et al. (2023) Cascade utilization of energy in high temperature syngas to reduce energy consumption in biomass gasification processes. *Case Studies in Thermal Engineering*, **52**, 103680. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103680>
71. Paskalov, G. (2015) RF PLASMA: From R&D to commercial applications. In: *Proc. of 22nd Inter. Symp. on Plasma Chemistry, July 5–10, 2015, Antwerp, Belgium*. <https://www.ispc-conference.org/ispcproc/ispc22/O-23-2.pdf>
72. Fazekas, P., Czégény, Z., Mink, J. et al. (2016) Decomposition of poly (vinyl chloride) in inductively coupled radiofrequency thermal plasma. *Chemical Eng. J.*, **302(15)**, 163–171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.05.044>
73. Merkhouf, A., Boulos, M.I. (2000) Distributed energy analysis for an integrated radio frequency induction plasma system. *J. of Physics D: Applied Physics*, **33(13)**, 1581–1587. DOI: <https://doi.org/0022-3727/33/13/304>
74. Tanaka, Y. (2021) Recent development of new inductively coupled thermal plasmas for materials processing. *Advances in Physics: X*, **6(1)**: 1867637. DOI: <https://doi.org/10.1080/23746149.2020.1867637>
75. Sairem. *Microwave and radio frequency*. <https://www.sairem.com/>
76. Kraus, W., Fantz, U., Heinemann, B., Franzen, P. (2015) Solid state generator for powerful radio frequency ion sources in neutral beam injection systems. *Fusion Eng. and Design*, **91**, 16–20. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2014.11.015>
77. Kuraishi, K., Akao, M., Tanaka, Y. et al. (2016) Temperature behavior in a tandem type of modulated induction thermal plasma for materials processing. *J. of Physics Conf. Series*, **441(1)**. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/441/1/012016>
78. Gajjar, S., Upadhyay, D., Singh, N. et al. (2021) Experimental results of 40 kW, 1 MHz solid state high frequency power supply with inductively coupled plasma. In: *Proc. of AIP Conf.*, **2373**, 100002. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0057477>
79. Vojtovich, V., Gordeev, A., Dumanevich, A. (2010) Si, GaAs, SiC, GaN – power electronics. Comparison, new possibilities. *Silovaya Elektronika*, **5**, 4–10.
80. *Semiconductor today*. <https://www.semiconductor-today.com/features.shtml>
81. <https://www.eetrend.com/content/2021/100555218.html> Debuted at CICD 2021 to empower the third-generation semiconductor industry with advanced ALD technology
82. *Proc. of 9th Inter. Conf. on Power Electronics for Plasma Eng. May 14–17, 2018, Freiburg, Germany*. <https://publica.fraunhofer.de/entities/mainwork/477cb287-1b40-424d-9d5c-ac4572604026>
83. Okumura, T. (2010) Inductively coupled plasma sources and applications. *Physics Research Inter.*, **1**. DOI: <https://doi.org/10.1155/2010/164249>
84. *PSTEK*. https://pstek.co.kr/wp-content/uploads/2019/12/PSTEK_Plasma-Power-Supplies.pdf
85. Georg, R., Chadwick, A.R., Dally, B.B., Herdrich, G. (2021) Power efficiency estimation of an inductive plasma generator using propellant mixtures of oxygen, carbon-dioxide and argon. *Acta Astronautica*, **179**, 536–545. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.11.020>

IMPLEMENTATION AND SUSTAINABILITY OF THE BIOMAS GASIFICATION PROCESS USING PLASMA TECHNOLOGIES

S.V. Petrov¹, O.I. Som², S.G. Bondarenko³, O.V. Sanginova³, M. Ganczarski⁴, E. Ró⁴

¹The Gas Institute of the NASU.

39 Degtyarivska Str., 03113, Kyiv, Ukraine

²Plasma-Master Co., Ltd.

3 Omelian Pritsak Str., 03142, Kyiv, Ukraine

³National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute».

37 Prosp. Beresteiskyi, 03056, Kyiv, Ukraine

⁴Hydrogenium P.S.A. (Simple Joint Stock Company)

3/27 Marii Curie-Skłodowskiej Str., Lublin, Poland, 20-029. E-mail: mg@hydrogenium.one

Waste biomass gasification technologies, especially with a focus on hydrogen production, have the potential for large-scale commercialization. The prerequisites for their development and promotion are innovative approaches to modeling, the use of traditional and new gasification mechanisms consistent with fundamental principles of theoretical physics; and the development of new technical solutions on this basis. Ultimately, the goal is to significantly improve the gasification process technical, economic, and environmental performance. In this context, plasma gasification is a promising renewable energy source from various wastes, including biomass. It contributes to achieving sustainable development goals: affordable and clean energy, climate change mitigation, waste diversion and resource reuse, reinforcing the concept of a circular economy. This paper presents an analysis and assessment of the conditions for increasing gasification processes reliability, productivity, and quality while reducing costs, including potential barriers to applying plasma technologies. The paper presents new technological solutions to the problems facing gasification, aimed at optimizing energy flows in the gasification reactor, rational use of plasma as a concentrated energy flow, reducing power consumption by plasma torches, and reducing the power and cost of plasma installations, as well as a radical solution to the problem of reliability of gasification equipment. The economic prospects for the transition to large-scale production, where a reduction in capital and operating costs can be expected, are considered. 85 Ref., 22 Fig.

Keywords: biomass gasification, plasma gasification, plasmatron, synthesis gas, gasifier, energy efficiency of the gasification process

Отримано 25.04.25

Отримано у переглянутому вигляді 16.07.25

Прийнято 24.07.25

ПРИЧИНИ РУЙНУВАННЯ СТАЛІ Fe–25Mn–10Al–1Si–2Ni–2Cr–1,4C–0,1V В ПРОЦЕСІ ГАРЯЧОЇ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ПІСЛЯ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВУ ЛИТОГО ЕЛЕКТРОДА З ПІДВИЩЕНИМ ВМІСТОМ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ

М.М. Ворон¹, А.М. Тимошенко¹, А.Ю. Семенко¹,
Ю.П. Скоробагатько¹, О.М. Смірнов¹, С.Л. Шваб²

¹ФТІМС НАН України.

03680, м. Київ, бульв. Академіка Вернадського, 34/1. E-mail: mykhailo.m.voron@gmail.com

²ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України.

3150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: serg.schwab@gmail.com

В роботі описано причини зростаючої актуальності досліджень, пов'язаних зі сталями, що мають низьку густину та містять велику кількість марганцю та алюмінію. Показано важливість і перспективність удосконалення технологічних процесів виплавки таких сталей, які залишаються доволі складними і дорогими. Найбільш економічно вигідним способом виплавки сталей Fe–Mn–Al–C є відкрита індукційна плавка з використанням в якості шихтових матеріалів відходів і чистих компонентів звичайної якості. Такий технологічний процес характеризується наявністю в литому металі великої кількості неметалевих включень, тому його доцільно проводити в комплексі з рафінуючим перепадом, зокрема, електрошлаковим. Для перевірки ефективності запропонованого рішення було проведено виплавку сталі Fe–25Mn–10Al–1Si–2Ni–2Cr–1,4C–0,1V та проведено її електрошлаковий перепад. Дослідження інтегрального та локального хімічного складу і мікроструктури вихідного зразка сталі в литому стані та після перепаду показали, що сталь індукційної виплавки містить карбідно-фосфідну евтектику. В результаті електрошлакового перепаду знизилась загальна кількість неметалевих включень, мікроструктура подрібнилася, стала більш рівномірною при відсутності шкідливих структурних складових у вигляді евтектичних ділянок. Зразок ЕШП піддавали гарячій пластичній деформації, що призвело до його руйнування. Встановлено, що причиною цього була крупна стовпчаста структура та накопичення оксидних плівок на поверхні гілок окремих дендритів. Одержані дані вказують на потребу удосконалення процесів електрошлакового перепаду дослідженого типу сталей в контексті більш ефективного виведення в шлак оксидних включень та подрібнення структури. Бібліогр. 13, табл. 2, рис. 6.

Ключові слова: сталь, електрошлаковий перепад, витратний електрод, шлак, флюс, коефіцієнт заповнення, продуктивність перепаду, злиток, неметалеві включення, хімічний склад, мікроструктура, гаряча пластична деформація

Вступ. Сталі на основі системи Fe–Mn–Al–C з вмістом марганцю, алюмінію та вуглецю вище 18,8 і 0,6 мас. % відповідно, належать до ряду найбільш інноваційних конструкційних матеріалів сучасності завдяки унікальному комплексу механічних характеристик, низькій густині та можливості регулювати структурно-фазовий стан і механічні властивості в широких межах через деформаційну та термічну обробку [1–4].

Для подальшого удосконалення сталей з високим вмістом марганцю та алюмінію важливим є поєднання двох аспектів — оптимізації їхнього хімічного складу та вибору ефективної технології виплавки. До переліку сплавів з одночасно високими показниками міцності та пластичності відносяться композиції Fe–(18...28)Mn–(8...13)

Al–(0,8...1,5)C мас. %. Часто до їхнього складу додаються хром і/або нікель у кількості до 5 мас. %, а також мікролегуєчі і модифікуючі добавки (Mo, V, Nb, Ti та ін.) у кількості 0,1...1,0 мас. % [5, 6]. Щодо способів приготування розплавів сплавів зазначеного типу, то вони потребують використання шихтових матеріалів з мінімальним вмістом шкідливих неметалевих включень, а через високий вміст алюмінію і марганцю потребують захисного середовища для запобігання утворення шкідливих оксидів та нітридів, здатних активно утворюватися при плавленні та литті, якщо вміст алюмінію у сталі перевищує 8 мас. %. Тому для виплавки сталей з високим вмістом марганцю й алюмінію

М.М. Ворон — <https://orcid.org/0000-0002-0804-9496>, А.М. Тимошенко — <https://orcid.org/0000-0003-4038-1744>,

А.Ю. Семенко — <https://orcid.org/0000-0002-0448-1636>, Ю.П. Скоробагатько — <https://orcid.org/0000-0002-1724-9895>,

О.М. Смірнов — <https://orcid.org/0000-0001-5247-3908>, С.Л. Шваб — <https://orcid.org/0000-0002-4627-9786>



Рис. 1. Зовнішній вигляд витратного електрода (а), одержаного злитка і залишку електрода (б) та лабораторної електрошлакової печі під час проведення переплаву (в)

часто застосовують вакуумну індукційну плавку та аргонодуговий переплав [7, 8].

З точки зору економічної вигоди і технологічної простоти найбільш привабливим способом виплавки розглянутого типу сталей можна вважати відкритої індукційну плавку з використанням в якості шихтових матеріалів сталевого брухту і чистих компонентів звичайної якості. За цих умов вміст сірки та фосфору у сталях Fe–Mn–Al–C буде наближатися до вмісту в інструментальних сталях, але утворення великої кількості крупних оксидних та нітридних включень буде неминучим і слабо контрольованим. За цих умов найбільш раціональним може стати відоме поєднання індукційної виплавки з подальшим електрошлаковим рафінуючим переплавом.

На сьогоднішній день кількість досліджень, присвячених електрошлаковому переплаву сталей з високим вмістом марганцю та алюмінію, залишається обмеженою [9], а більшість відомих робіт присвячені переважно дослідженню однорідності хімічного складу та його змін, вмісту сірки та фосфору, структурно-фазовим характеристикам і дефектам злитків [10]. Виходячи з цього, в представленій роботі було розглянуто не лише відмінності структурно-фазового стану сплаву у вихідному стані та після переплаву, але також проаналізовано початковий і кінцевий вміст домішок та вплив

зменшення їх концентрації на зміну хімічного складу сплаву після ЕШП. Також проведено оцінку здатності сплаву до гарячої пластичної деформації після рафінуючого переплаву і проаналізовано поверхні утворення гарячих тріщин.

В ході проведення досліджень способом відкритої індукційної виплавки було одержано витратний електрод сталі складу Fe–25Mn–10Al–1Si–2Ni–2Cr–1,4C–0,1V. Для його виготовлення в якості шихтових матеріалів використовували відходи сталі 45, алюмінієвого сплаву АК12, ферохром ФХ800А та чисті компоненти звичайної якості: марганець Mn95, нікель Н-1, хром Х97,5, алюміній А5, ванадій ВнМ-1 та графітову крихту. Плавку проводили в індукційній печі потужністю 25 кВт з робочим об’ємом 1 л. Піч було футеровано сумішшю $Al_2O_3:MgO = 80:20$.

Шихтові матеріали розплавляли, починаючи з утворення розплаву сталі 45, додаючи безпосередньо перед цим вуглець. Після цього вводили всі інші компоненти поступово та рівномірно. Для рафінування розплаву застосовували додавання магнію та лантану в складі лігатур Ni–16Mg і Al–45La в загальній кількості до 0,3 % та CaO у кількості до 1 % від маси шихти [11]. При температурі 1500 °С розплав перемішували, продували аргоном 10 с та знімали шлак. Після досягнення

Таблиця 1. Хімічний склад досліджуваних зразків, мас. %

Зразок	Mn	Al	Si	Ni	Cr	C	V	S	P	N	Fe — основа
Електрод	25,1	10,2	1,2	1,8	2,1	1,42	0,09	0,032	0,050	0,027	
Злиток	24,7	10,4	0,9	1,7	2,0	1,40	0,08	0,028	0,037	0,020	

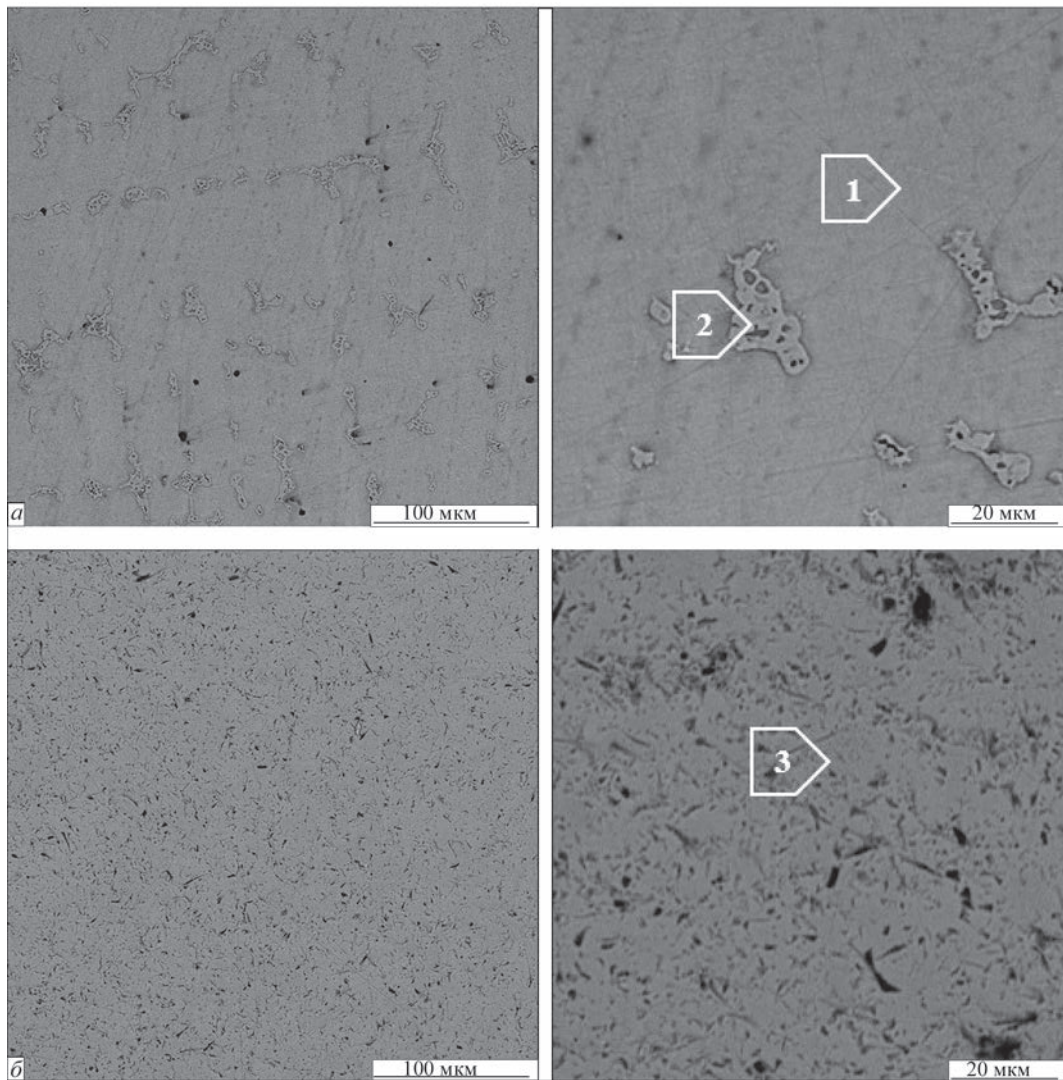


Рис. 2. Порівняння мікроструктур сталі Fe-25Mn-10Al-1Si-2Ni-2Cr-1,4C-0,1V в литому стані (а) та після електрошлакового переплаву (б) з позначеннями для визначення локального хімічного складу структурних складових

розплавом температури 1450 °С його заливали у пісчану форму зі зв'язуючим на рідкому склі. В результаті цього було одержано електрод діаметром 25 мм і висотою 500 мм.

Електрошлаковий переплав сплаву, відлитого в електрод діаметром 25 мм (рис. 1, а) здійснювали в водоохолоджуваному кристалізаторі діаметром 50 мм на лабораторній печі УШ-114 (рис. 1, б), при цьому коефіцієнт заповнення склав 0,27. Джерелом живлення УШ-114 є зварювальний трансформатор змінного струму з круто падаючою характеристикою та загальною потужністю 45 кВА, який має вольт-амперну характеристику 750 А та 60 В. В якості флюсу було використано шлакоутворюючу суміш $\text{CaF}_2:\text{Al}_2\text{O}_3:90:10$, яку можна розглядати як одну з найбільш оптимальних для рафінування досліджуваного типу сталей від неметалевих включень [12, 13]. Наведення шлакової ванни відбувалося протягом 2 хв, а загальне плавлення електрода проходило протягом 7 хв при 700 А, 36 В. В результаті перепла-

ву було отримано злиток масою 1,6 кг, продуктивність процесу переплаву склала 13,7 кг/год. Злиток в нижній частині на початку процесу плавлення електрода та розплавлення флюсу мав характерні борозди на поверхні, що може свідчити про вміст вологи у вхідному флюсі, оскільки флюс використовувався без попереднього прокалювання. Оскільки метал електрода мав великий вміст високореакційного металу — (8...13 %) Al та (18...28 %) Mn, початок плав-

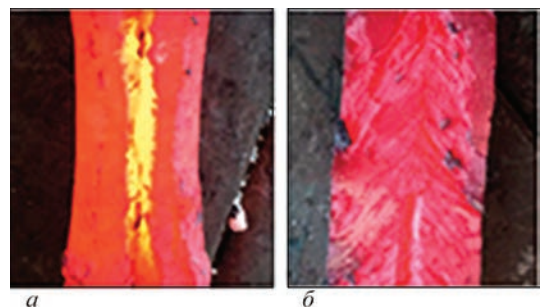


Рис. 3. Зовнішній вигляд злитка після руйнування під час гарячої пластичної деформації (а) та його поверхня руйнування (б)

Таблиця 2. Хімічний склад (мас. %) структурних складових (рис. 3)

Зразок	Mn	Al	Si	Ni	Cr	C	V	S	P	Fe — основа
Електрод	25,1	10,4	0,9	1,5	1,6	5,9	0,05	–	0,05	
	35	1,0	5,1	2,16	6,7	6,6	0,41	0,03	0,35	
Злиток	24,7	9,9	1,1	1,9	1,8	5,2	0,06	–	0,07	

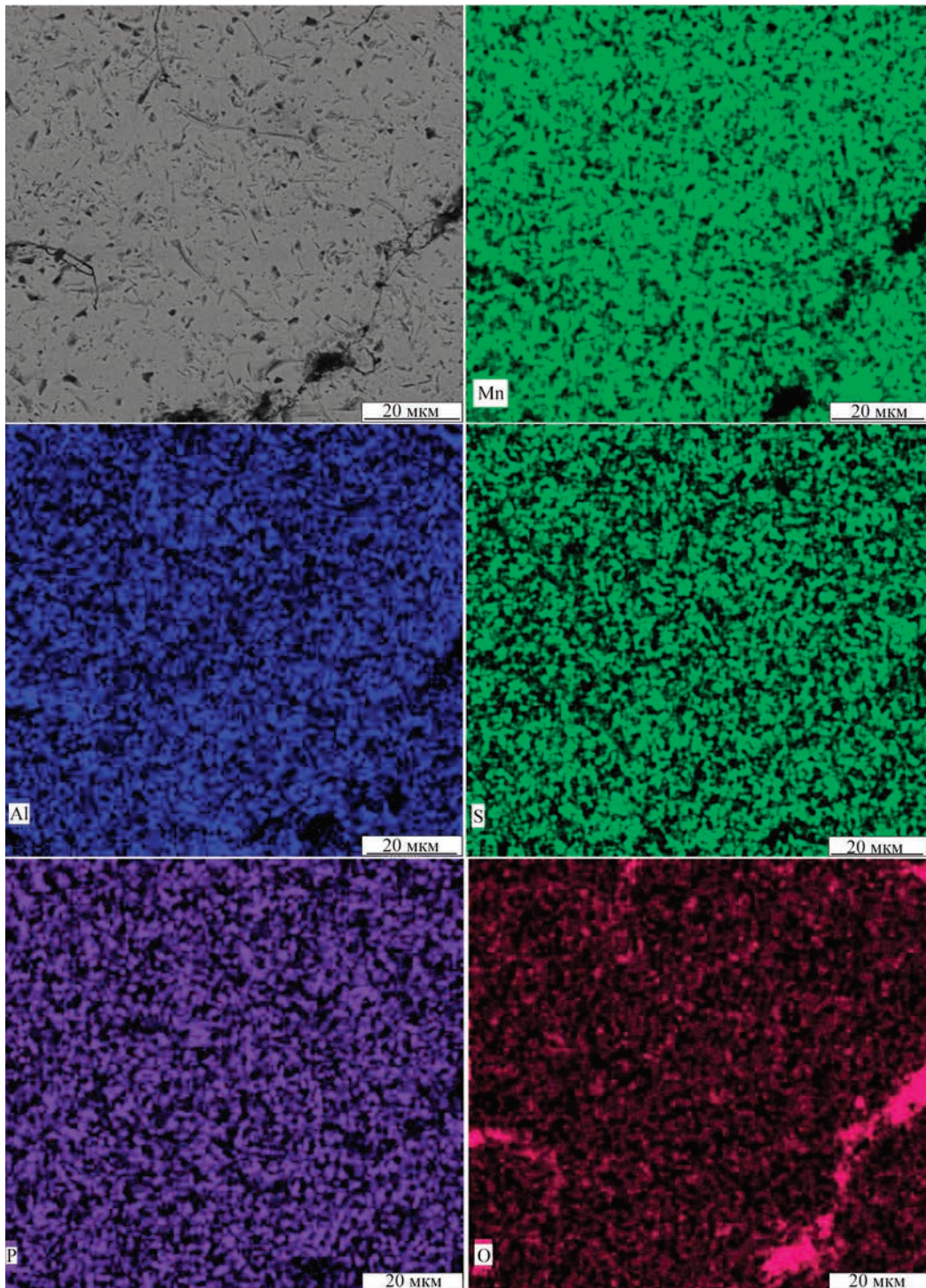


Рис. 4. Розподіл Mn, Al, S, P, O в дефектній частині злитка ЕШП

лення супроводжувався активним розкисленням шлаку та газовиділенням, що спричинило ці дефекти поверхні. Зовнішній вигляд отриманого зливка після описаного процесу переплаву приведено на рис. 1, в.

В ході виконання досліджень аналізували хімічний склад виливка-електрода та зливка після рафінуючого переплаву. Для цього було використано оптично-емісійний дуговий аналізатор SPECTROMAXx десятого покоління, який забезпечує високу точність вимірювання хімічного складу сплавів. Порівняння хімічного складу вихідного сплаву та після рафінуючого переплаву приведено в табл. 1.

З аналізу хімічного складу можна свідчити про помітне, але не вирішальне зменшення кількості сірки, фосфору та азоту. Одночасно з цим, оцінити вміст кисню та оксидів, які разом з нітридними включеннями найбільш сильно впливають на технологічність та механічні властивості сталей з високим вмістом марганцю та алюмінію, залишається задачею, яку було оцінено за допомогою електронної мікроскопії з локальним хімічним аналізом структурно-фазових складових. Для цього було використано електронний мікроскоп Tescan Vega 3 з EDX-аналізатором Bruker.

Порівняння мікроструктур вихідного сплаву та зливка ЕШП показали їх помітну відмінність (рис. 2). Обидва демонструють однофазну аустенітну структуру. В структурі литого витратного електрода розмір зерен складає 30...60 мкм, а на їх межах спостерігається наявність карбідно-фосфідної евтектики, на що вказують дані локального хімічного аналізу, наведені в табл. 2. Значення вмісту вуглецю в даному випадку мають якісний характер. Зразок після ЕШП характеризувався більш дрібною та рівномірною мікроструктурою з нечіткими межами зерен та відсутністю евтектичних ділянок і неметалевих включень.

Для оцінки якості зливка ЕШП та його придатності до деформаційної обробки було проведено гаряче прокатування рафінованого зразка на прокатному двовалковому стані «Skoda». Злиток піддавали гомогенізаційному відпалу 1050 °С протягом 1 год та подальшій прокатці при цій температурі зі ступенем обтиснення 5 % за прохід. Після двох проходів під час гарячої пластичної деформації злиток зруйнувався, що показано на рис. 3. Двома очевидними причинами руйнування могли бути наявність газоусадкової порожнини в нижній частині зливка та

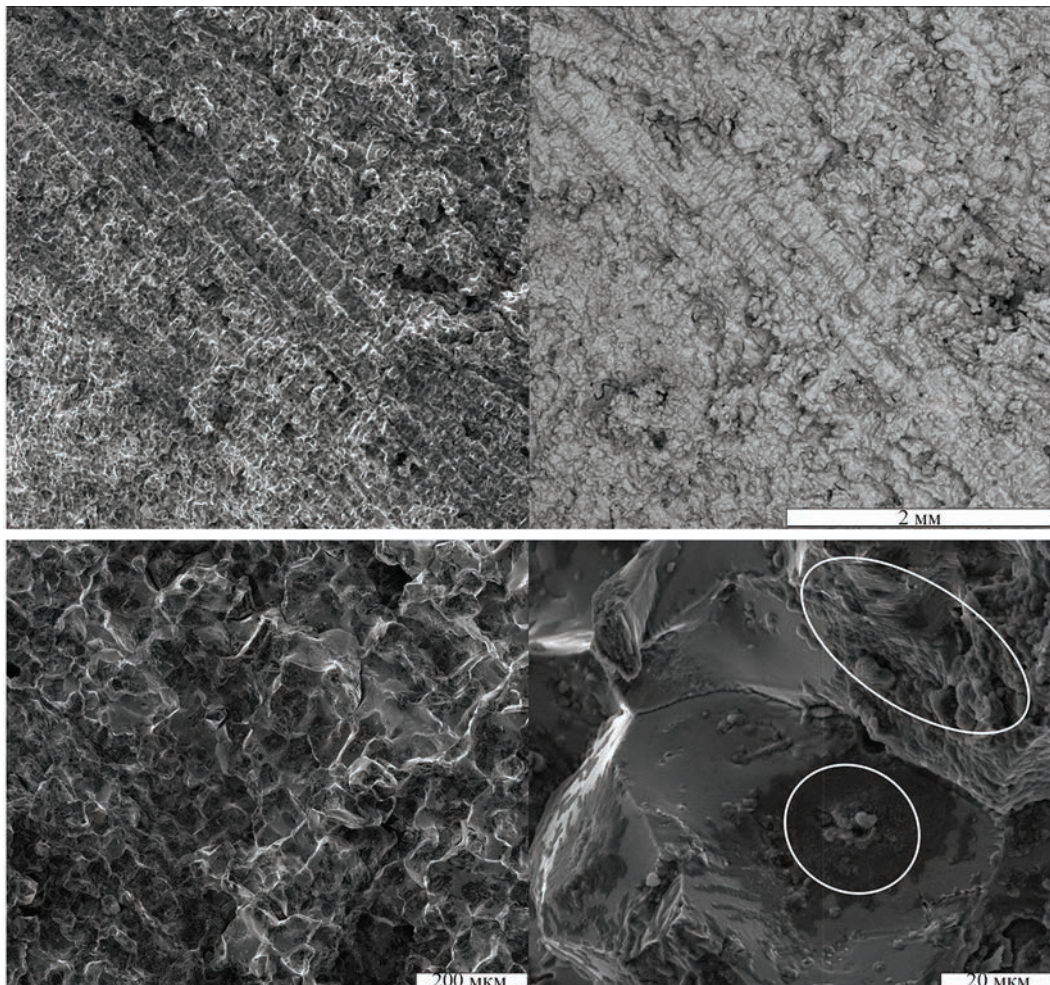


Рис. 5. Мікроструктура поверхні гарячої тріщини зливка сталі Fe-25Mn-10Al-1Si-2Ni-2Cr-1,4C-0,1V після ЕШП

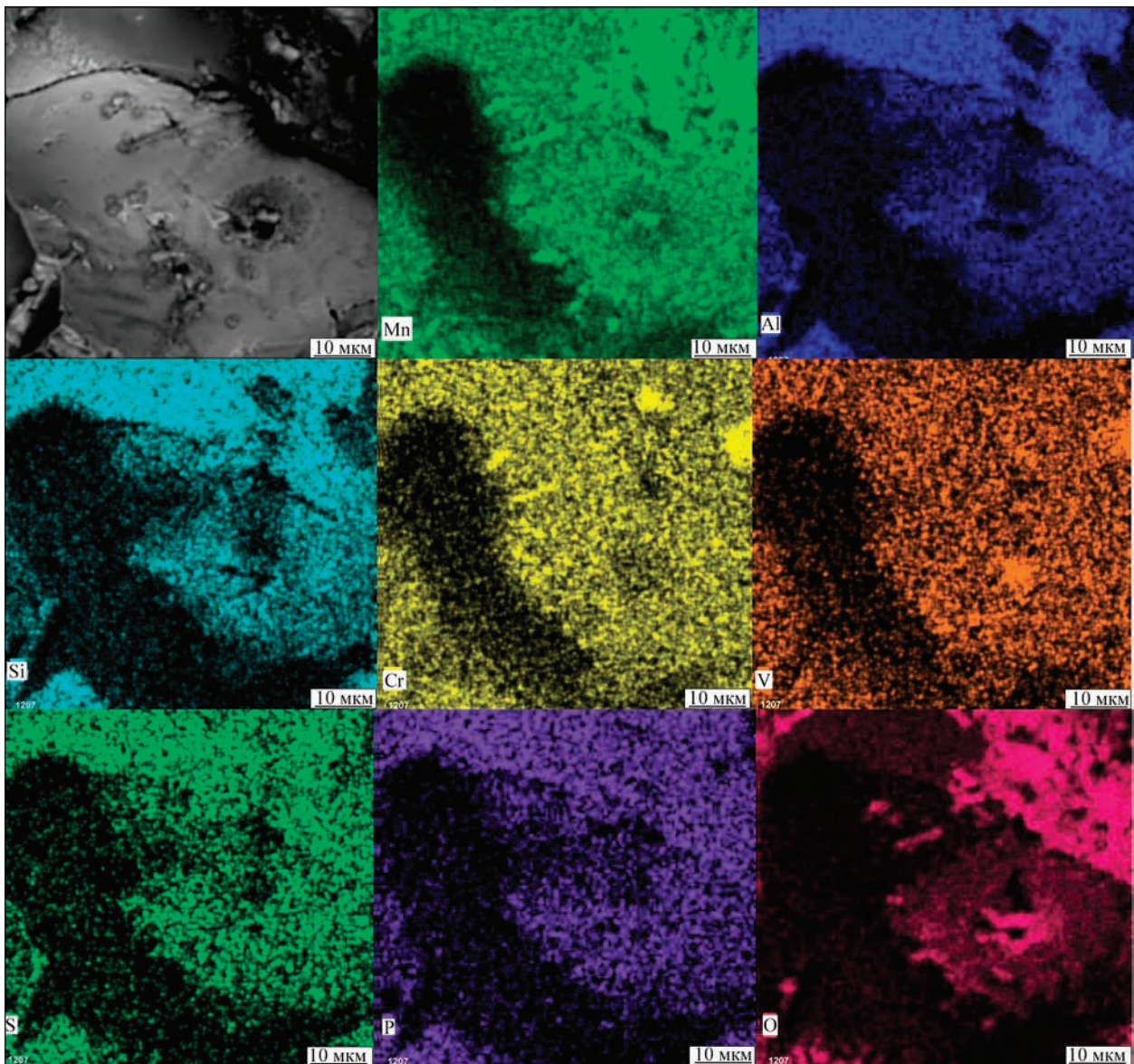


Рис. 6. Розподіл хімічних елементів на поверхні дендритної гілки, розташованої в гарячій тріщині сталі Fe–25Mn–10Al–1Si–2Ni–2Cr–1,4C–0,1V

помітно виражена стовпчата макроструктура. Остання може поєднуватись зі збільшеною кількістю домішок на межах зерен і сприяти руйнуванню.

По-перше, було досліджено характер розподілу домішок у частині злитка, яка мала незначну мікродфектність. Дані розподілу елементів наведено на рис. 4.

З одержаного розподілу хімічних елементів видно, що сірка та фосфор присутні в складі зразку ЕШП суцільним рівномірним фоном та не утворюють окремих включень, а найбільша дефектність спостерігається через часткове збереження тонких оксидних плівок, від яких не вдається повністю рафінувати сплав. Для більш повного розуміння причин утворення гарячих тріщин у сплаві під час його деформації було досліджено безпосередньо поверхню зламу, що показано на рис. 5.

Структура зламу відповідає міжкристалітному крихкому руйнуванню. При цьому на поверхні деяких гілок дендритів можна помітити точкові дефекти і ділянки накопичення оксидних включень, що позначено на рисунку. Утворення таких дефектних зон як при звичайному литті, так і при формуванні злитка під час ЕШП можна пояснити повільною кристалізацією. За таких умов більшість домішок виштовхується фронтом кристалізації до місць поєднання окремих дендритів і накопичуються там, стаючи причинами руйнування сплаву при навантаженні. Очевидно, через високу щільність та низьку пластичність таких включень, вони перешкоджають структурній гомогенізації та рекристалізації.

Походження і якісний хімічний склад включень було оцінено за допомогою аналізу розподілу хімічних складових сплаву за методикою EDX-mapping,

як показано на рис. 6. В результаті досліджень встановлено, що сталь Fe–25Mn–10Al–1Si–2N–2Cr–1,4C–0,1V виплавлена відкритим індукційним способом після подальшого електрошлакового переплаву містить залишки оксидних включень, які можуть представляти собою в першу чергу оксиди марганцю та алюмінію. В зоні існування оксидів на межах зерен (гілок дендритів) спостерігається утворення комплексних карбідів хрому і ванадію (Fe, Cr, V)₂₃C₆ та, імовірно, κ-карбідів (Fe, Mn)₃AlC. Сульфідні та фосфідні включення виявлені не були.

Висновки

1. Одержані результати показують, що виплавка сталей Fe–Mn–Al–C відкритим індукційним способом може бути перспективним рішенням для суттєвого зниження їх вартості та спрощення виробничого процесу. При цьому, в таких умовах литий метал містить підвищену кількість домішок, особливо оксидів, що безпосередньо пов'язано з окисненням компонентів сталі під час плавлення та лиття. Також в його структурі окрім неметалевих включень присутні ділянки шкідливої для механічних властивостей фосфідно-карбідної евтектики.

2. Застосування подальшого рафінуючого електрошлакового переплаву литих заготовок індукційної виплавки суттєво покращує структурно-фазові характеристики досліджуваної сталі, але не є здатним повністю видалити неметалеві включення у вигляді оксидів. Показано їхнє переважне розташування на поверхні дендритів, що відбувається через повільну направлену кристалізацію розплаву, коли повільне зростання стовпчастих зерен сприяє виштовхуванню домішок перед фронтом кристалізації та їх накопиченню в місцях об'єднання дендритів. Така конгломерація оксидів може утворювати структурно несучільні ділянки, по яких в процесі гарячої пластичної деформації відбувається руйнування злитків за крихким механізмом. Шкідливі включення, які є причиною руйнування злитків, представлені переважно оксидами алюмінію і марганцю, та в меншій мірі — дрібними включеннями сульфиду марганцю і карбідами складного хімічного складу.

3. Нівелювання описаних явищ має ґрунтуватися на підвищенні вихідної чистоти витратного електрода, підвищенні рафінуючої здатності процесу ЕШП і контрольованому процесі структуроутворення та зерноподрібнення злитка в процесі переплаву сталей Fe–Mn–Al–C.

Дослідження фінансується Національним фондом досліджень України, конкурс «Наука для зміцнення обороноздатності України» (проект № 2023.04/0021), «Одержання елементів броні з надлегких сталей для військової техніки з використанням вторинної сировини».

Список літератури/References

- Bai, S., Chen, Y., Liu, X. et al. (2023) Research status and development prospect of Fe–Mn–C–Al system low-density steels. *J. of Materials Research and Technology*, **25**, 1537–1559. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.0372>.
- Ding, H., Liu, D., Cai, M., Zhang, Y. (2022) Austenite-based Fe–Mn–Al–C lightweight steels: Research and prospective. *Metals*, **12**(10), 1572. DOI: <https://doi.org/10.3390/met12101572>
- Moon, J., Ha, H.Y., Kim, K.W. et al. (2020) A new class of lightweight, stainless steels with ultra-high strength and large ductility. *Sci Rep.*, **10**, 12140. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69177-7>
- Shin, J-H., Song, J-Y., Kim, S-D. et al. (2022) Microstructure, tensile, and fatigue properties of large-scale austenitic lightweight steel. *Materials*, **15**(24), 8909. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15248909>
- Ren, X., Li, Y., Qi, Y., Wang, C. (2022) Effect of micro-alloyed/alloved elements on microstructure and properties of Fe–Mn–Al–C lightweight steel. *Metals*, **12**(4), 695. DOI: <https://doi.org/10.3390/met12040695>
- Raabe, D., Springer, H., Gutierrez-Urrutia, I. et al. (2014) Alloy design, combinatorial synthesis, and microstructure-property relations for low-density Fe–Mn–Al–C austenitic steels. *JOM*, **66**, 1845–1856. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-014-1032-x>
- Zhang, L., Thomas, B.G. (2006) State of the art in the control of inclusions during steel ingot casting. *Metall. Mater. Transact. B*, **37**, 733–761. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-006-0057-0>
- Bai, Y., Tian, K., Li, J., Yang, Z. (2021). Microstructure and oxidation behavior of Fe–25Mn–9Al–8Ni–1C–_xTi alloy prepared by vacuum arc melting. *Materials*, **14**(24), 7722. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14247722>
- Zaitsev, V.A., Kostetskiy, Yu.V., Polishko, G.O. et al. (2023) Investigations of the quality of metal of high-manganese steel alloyed by aluminium and chromium after electroslag remelting. *Suchasna Elektrometalyrhiya*, **4**, 17–27 [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2023.04.02>
- Medovar, G., Stovpchenko, L., Lisova, Zh. et al. (2023) Features and restrictions of electroslag remelting with silica-bearing slags for lightweight high manganese steel. *Steel Research*, **94**(11), 2300161. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.202300161>
- Ji, Y., Zhang, M.-X., Ren, H. (2018) Roles of lanthanum and cerium in grain refinement of steels during solidification. *Metals*, **8**(11), 884. DOI: <https://doi.org/10.3390/met8110884>
- Dong, Y., Jiang, Z., Yu, A. (2016) Dissolution behavior of alumina-based inclusions in CaF₂–Al₂O₃–CaO–MgO–SiO₂ slag used for the electroslag metallurgy process. *Metals*, **6**(11), 273. DOI: <https://doi.org/10.3390/met611027321>
- Mapelli, C. (2006) Control and engineering of non-metallic inclusions belonging to _xSiO₂–_yCaO–_zAl₂O₃ system in Ca-treated Al-killed and Al–Si-killed steel. *Steel Research Inter.*, **77**(7), 462–471. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.200606416>

CAUSES FOR Fe–25Mn–10Al–1Si–2Ni–2Cr–1.4C–0.1V STEEL FRACTURE
DUE TO HOT PLASTIC DEFORMATION AFTER ELECTROSLAG REMELTING
OF A CAST ELECTRODE WITH AN INCREASED CONTENT OF NON-METALLIC INCLUSIONS

M.M. Voron¹, A.M. Tymoshenko¹, A.Yu. Semenko¹, Yu.P. Skorobagatko¹, O.M. Smirnov¹, S.L. Schwab²

¹Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine.

34/1 Vernadskii Blvd, 03680, Kyiv, Ukraine. E-mail: mykhailo.m.voron@gmail.com

²E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: serg.schwab@gmail.com

The paper describes the reasons for the growing relevance of research related to steels with a low density and high manganese and aluminum content. The importance and prospects of improving the technological processes for smelting such steels are shown, which remain quite complex and expensive. The most economically advantageous method for smelting Fe–Mn–Al–C steels is open induction melting using secondary materials and pure components of ordinary quality as charge materials. Such a technological process is characterized by the presence of a large number of non-metallic inclusions in the as-cast metal, so it is advisable to conduct it in combination with refining remelting, in particular — electroslag process. To verify the effectiveness of the proposed solution, Fe–25Mn–10Al–1Si–2Ni–2Cr–1.4C–0.1V steel was smelted and its electroslag remelting was carried out. Studies of the integral and local chemical composition and microstructure of the initial steel sample in the as-cast state and after remelting showed that induction melted steel contains carbide-phosphide eutectic. After electroslag remelting, the total amount of non-metallic inclusions decreased, and the microstructure was refined, becoming more uniform without any harmful structural eutectic components. The ESR-sample was subjected to hot plastic deformation, which led to its destruction. It was found that the reason for this was the large columnar structure and the accumulation of oxide films on the surface of the of individual dendrites branches. The obtained data indicates the need to improve the processes of electroslag remelting of the studied type of steels in the context of more effective oxide inclusions removal into the slag and structure refining. 13 Ref., 2 Tabl., 6 Fig.

Keywords: steel, electroslag remelting, consumable electrode, slag, flux, filling ratio, remelting efficiency, ingot, non-metallic inclusions, chemical composition, structure, hot plastic deformation

Отримано 07.06.2025

Отримано у переглянутому вигляді 14.07.2025

Прийнято 04.08.25

Конференція «Зварювання та споріднені технології для відновлення України»

м. Київ, 27 листопада 2025 р.

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України

Тематика конференції:

- дугові процеси зварювання та наплавлення;
- променеві та плазмові технології зварювання, наплавлення і нанесення покриттів;
- гібридні процеси зварювання;
- 3D адитивні технології отримання металевих виробів;
- спеціальна електromеталургія;
- матеріалознавство в зварюванні та споріднених технологіях;
- неруйнівний контроль та технічна діагностика.

Для участі в роботі конференції необхідно надіслати заявку в Оргкомітет (участь безкоштовна). До початку конференції буде видано збірку тез/доповідей тільки в електронному форматі. Об'єм публікацій необмежений. Збірку тез/доповідей буде розміщено на сайті видавництва ІЕЗ ім. Є.О. Патона. Тривалість доповідей до 20 хвилин (15 хвилин доповідь, 5 хвилин обговорення). Розмір плакату для участі в роботі сесії стендових доповідей: А0 або А1. Сесія стендових доповідей буде проводитись паралельно з пленарними доповідями.

Конференція буде проходити у гібридному форматі (очно та онлайн), за вибором учасників. Офіційні мови конференції українська та англійська.

Контрольні дати.

Подання заявок та тез/доповідей до 04.11.2025

Подання заявок без доповіді до 24.11.2025

Розсилка програми до 20.11.2025

Вартість публікації.

Одна сторінка в збірці тез/доповідей – 150 грн.

Надання індексу DOI для тези/доповіді – 150 грн.

Надання сертифіката учасника – 150 грн.

Рахунок для оплати надається за запитом учасника.

Контакти

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України

вул. Казимира Малевича, 11, м. Київ, 03150, Україна

тел./факс: (38044) 205-23-90, E-mail: journal@paton.kiev.ua



ПРОМИСЛОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ПОЗАДОМЕННОГО ВІДНОВЛЕННЯ ЗАЛІЗА З РУДНОЇ СИРОВИНИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ВОДНЮ ДЛЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ

В.О. Шаповалов¹, В.Г. Могилатенко^{1,2}, Д.М. Жиров¹, В.Р. Бурнашев¹

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України.

03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: shapovalov@paton.kiev.ua

²НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

03056, м. Київ, Берестейський просп., 37. E-mail: vmogilatenko@gmail.com

Суттєвого зниження викидів вуглекислого газу в металургії можна досягти використанням для відновлення заліза суміші монооксиду вуглецю та водню. Розглянуто промислові технології позадоменного відновлення заліза з рудної сировини. Проаналізовано реакції у відновлювальних процесах. Показано, що за температур понад 800 °С водень є більш ефективним відновником, ніж монооксид вуглецю. Продемонстровано шляхи підвищення енергетичної ефективності існуючих технологій. Показано, що на сьогодні основною технологією відновлення заліза з руди є відновлення у шахтних печах з використанням суміші вуглекислого газу і водню. Наведено узагальнену схему виробництва прямого відновлення заліза. Показано, що при виробництві заліза прямого відновлення завдяки використанню водню можна скоротити вдвічі викиди вуглекислого газу у порівнянні з використанням природного газу, за умови виробництва електроенергії з відновлювальних джерел або на атомних електростанціях. Зроблено висновок, що перспективним шляхом вилучення викидів вуглецю при відновленні заліза з руди чи котунів є використання плазмових технологій. Бібліогр. 14, табл. 2, рис. 1.

Ключові слова: пряме відновлення заліза, водень, шахтна піч, викиди вуглекислого газу

Вступ. Виробництво чавуну і сталі спричиняє близько 7 % глобальних викидів вуглекислого газу через використання вуглецю для відновлення заліза з руди [1]. На теперішній час основною схемою одержання сталі із залізорудної сировини є відновлення заліза у доменних печах з одержанням чавуну і переробка чавуну в сталь у кисневих конверторах. Істотного скорочення викидів вуглекислого газу в цих процесах неможливо досягти через їх технологічні схеми. Адже у доменній печі шари залізорудних матеріалів чергуються з шарами коксу, основним елементом якого є вуглець. Шари коксу забезпечують газопроникність стовпа шихти, підтримують відновлювальний потенціал газової фази у верхній частині печі, вуглець коксу є безпосереднім відновником у нижній частині печі та основним джерелом енергії для нагріву шихти і протікання хімічних реакцій. У кисневих конверторах вуглець чавуну окиснюється поки його концентрація не знижується до необхідної у сталі. При цьому вигорання вуглецю є основним джерелом енергії для процесу.

Істотного зниження викидів вуглекислого газу в чорній металургії можна досягнути лише при використанні відновника, що не містить вуглецю. З погляду на доступність, вартість, екологічність і відновлювальні властивості найбільш доцільним для відновлення заліза є використання водню.

Існує багато способів виробництва водню [2]. Бурий або чорний водень одержують при газифікації вугілля з використанням водяної пари, сірий — при паровому риформінгу природного газу (якщо викиди вуглецю при цьому вловлюють і зберігають, то такий водень називають блакитним), бірюзовий — при піролізі природного газу з одержанням твердого вуглецю. Але у перелічених способах існує необхідність видобування паливних корисних копалин і в результаті крім водню утворюється вуглець або його оксиди, які треба утилізувати. Принципово іншим напрямком одержання водню є електроліз води. При цьому, якщо для електролізу використовується атомна енергія, водень називають рожевим, якщо електроенергія різного походження — жовтим, якщо використовується електроенергія тільки з відновлювальних джерел — зеленим. Зелений водень є найбільш екологічним, але при цьому й найбільш коштовним. Тому важливо забезпечити мінімальні втрати водню у металургійному процесі. Заміна вуглецю воднем у якості відновника дозволить значно скоротити викиди вуглекислого газу у металургії, але очевидно, що при цьому має застосовуватися інша технологічна схема виробництва сталі з залізорудної сировини. Також важливо мінімізувати витрати енергії з погляду на екологічні і економічні фактори.

Стан проблеми. Залізо, одержане за технологіями позадоменного відновлення, назива-

В.О. Шаповалов — <https://orcid.org/0000-0003-1339-3088>, В.Г. Могилатенко — <https://orcid.org/0000-0002-6550-2058>,

Д.М. Жиров — <https://orcid.org/0000-0002-9435-8075>, В.Р. Бурнашев — <https://orcid.org/0000-0001-6807-3810>

ють залізом прямого відновлення (DRI — Direct Reduction Iron). Його частка в об'ємі світового виробництва чавуну і DRI щороку зростає. Так у 2021 р. вона складала 7,2 %, у 2022 р. — 7,9 %, а у 2023 р. — 8,5 % [3]. У 2023 р. об'єми виробництва DRI склали 136 мільйонів тон [4]. Із них близько 30 % вироблено за технологіями, що базуються на використанні вугілля. Найчастіше це процеси у трубчастих печах, що обертаються (наприклад процес SL/RN), або у печах з подом, що обертається. Більшість цих установок розташовані в Індії або Південній Африці, що зумовлено розвинутою вугільною промисловістю в цих країнах. Але використання вуглецю з вугілля у якості відновника унеможливує суттєве скорочення викидів вуглекислого газу у порівнянні з доменним процесом.

Найбільш поширеною групою промислових технологій виробництва DRI є технології відновлення у шахтних печах: MIDREX (близько 80 % виробництва DRI у шахтних печах), Hyl/Energiron (17 %), Pered (3 %), Finmet, Circored, Fior та ін. [4–8]. На сьогоднішній день потужність окремих шахтних печей може сягати 2,5 млн т на рік, наприклад Tosyali Algérie та Algerian Qatari Steel (Алжир, MIDREX), Nucor Steel Louisiana (США, Energiron).

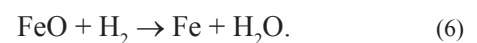
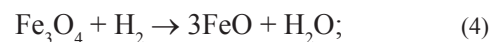
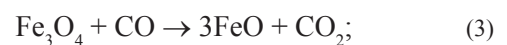
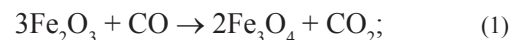
У футерованій шахтній печі відбувається, як і у доменній печі, протіччя залізовмісних шихтових матеріалів (кускової залізної руди або залізородних котунів), які опускаються під дією сили тяжіння, і спрямованих вгору відновлювальних газів, які складаються здебільшого з водою і монооксиду вуглецю. Температура у технологічному процесі регулюється таким чином, щоб не відбувалося розм'якшення та злипання шихтових матеріалів. Через це немає необхідності у шарах коксу у стовпі шихтових матеріалів, одним з призначень яких у доменній печі є забезпечення газопроникності шихти. В якості відновника в таких процесах можуть використовуватися різноманітні відновлювальні гази: коксовий газ, продукти газифікації вугілля, природний газ або продукти його конверсії, водень. Більшість установок такого типу побудовано на Близькому Сході, у Північній Африці та Карибському регіоні, тобто у регіонах, багатих на природний газ. Відповідно технологічні процеси, що використовуються в існуючих установках, здебільшого розраховані на використання природного газу або продуктів його конверсії. Але розробники відзначають можливість корегування технологій для використання різноманітних газоподібних відновників, без вмісту вуглецю.

Однією з переваг використання газоподібних відновників є їх чистота. Тобто, на відміну від коксу і вугілля, вони не приносять додаткових домішок у DRI, таких як сірка, фосфор чи миш'як. Таким чином, вміст шкідливих домішок у продукті залежить тільки від чистоти залізородної си-

ровини. З іншого боку, вся порода, що міститься у залізородних матеріалах, залишається у DRI і потрапляє у сталеплавильні печі, що призводить до збільшення кількості шлаку і витрати енергії. Тому шихтові матеріали мають містити якомога меншу кількість породи. Оптимальним вважається наступний склад залізної руди або залізородних котунів, % [5]: Fe = 67,0; SiO₂ + Al₂O₃ = 3,0; S = 0,008; P = 0,03; TiO₂ = 0,15.

Існує мало покладів такої багатой залізної руди. Зокрема у товарних рудах Криворізького басейну середній вміст заліза коливається від 46,9 до 65,6 % [9]. Це зумовлює необхідність як і для доменного процесу, так і збагачення відносно бідних залізних руд. Для ефективного збагачення руди її подрібнюють, а після збагачення грудкують з одержанням агломерату для доменної печі або котунів для доменної печі чи виробництва DRI. На відміну від доменної печі, одержання заліза прямого відновлення можливе у киплячому шарі подрібнених залізородних матеріалів [8, 10, 11]. Це досягається завдяки використанню газоподібних відновників і обмеженому нагріву залізородної сировини. На теперішній час такі технології поки не знайшли широкого застосування, ймовірно через запобігання злипання окремих частинок. Але вони беззаперечно мають перспективи завдяки усуненню витрат на грудкування, через що можливе істотне зменшення собівартості DRI.

Шахтну піч для одержання DRI можна поділити на зони попереднього нагріву шихтових матеріалів, відновлювальних реакцій, подачі відновлювальних газів і вивантаження металізованого продукту [5, 6]. Основні відновлювальні реакції — це реакції відновлення заліза з вищих оксидів до нижчих і далі до металевого заліза монооксидом вуглецю та воднем:



Реакції (1) і (2) відбуваються відносно легко у верхній частині печі. Реакції (3)–(6) потребують значного надлишку відновника. У табл. 1 наведено склад рівноважних газових сумішей для реакцій відновлення в залежності від температур [11].

З табл. 1 видно, що найбільшого надлишку відновника потребують реакції (5) і (6), тобто реакції одержання металевого заліза. Причому з ростом

Таблиця 1. Склад рівноважних газових сумішей для реакцій відновлення H_2O/H_2 або CO_2/CO

Реакція	Температура, °C						
	600	700	800	900	1000	1100	1200
(3)	55,2/44,8	64,8/35,2	71,9/28,1	77,6/22,4	82,2/17,8	85,9/14,1	88,9/11,1
(4)	30,1/69,9	54,2/45,8	71,3/28,7	82,3/17,7	89,0/11,0	92,7/7,3	95,2/4,8
(5)	47,2/52,8	40,0/60,0	34,7/65,3	31,5/68,5	28,4/71,6	26,2/73,8	24,3/75,7
(6)	23,9/76,1	29,9/70,1	34,0/66,0	38,1/61,9	41,1/58,9	42,6/57,4	44,5/55,5

температур відновлювальна здатність водню збільшується, а монооксиду вуглецю зменшується за реакцією (5). За температур понад 800 °C водень є більш ефективним відновником, ніж монооксид вуглецю, і з термодинамічної точки зору можливе відновлення заліза тільки за рахунок водню. Але у будь-якому разі менше половини відновника може бути використано для відновлення заліза до металу за умови рівноважного стану. У реальних промислових процесах рівноважний стан не досягається, тому необхідний ще більший надлишок відновника. Очевидно, що для економічного використання відновників газу, що відходять з шахтної печі, необхідно очищувати та використовувати повторно.

У результаті протікання відновлювальних реакцій ступінь металізації заліза у промислових технологіях складає близько 94 %.

Використання DRI є найбільш доречним для виплавки сталі у дугових сталеплавильних печах (ДСП). Адже, з одного боку, робота ДСП не призводить до значних викидів вуглекислого газу за умови чистої генерації електроенергії. З іншого боку, DRI, на відміну від металобрухту, відзначається відомим і сталим хімічним складом і, за умови чистої залізородної сировини, його використання не потребує значних засобів рафінування сталі.

Початково продуктом шахтних установок були лише металізовані котуни, охолоджені перед вивантаженням — Cold Direct Reduction Iron (CDRI) [5]. Але вони мають певний недолік — схильність до окиснення і навіть до загоряння через розвинену поверхню [11]. Тому згодом для більш зручного і безпечного транспортування і зберігання продукції на деяких заводах впроваджено вивантаження гарячого продукту до пресу валкового типу, на якому формується продукція у вигляді щільних подушкоподібних брикетів — hot briquetted iron (HBI). У 2023 р. частка HBI склала близько 9 % від виробництва DRI [4].

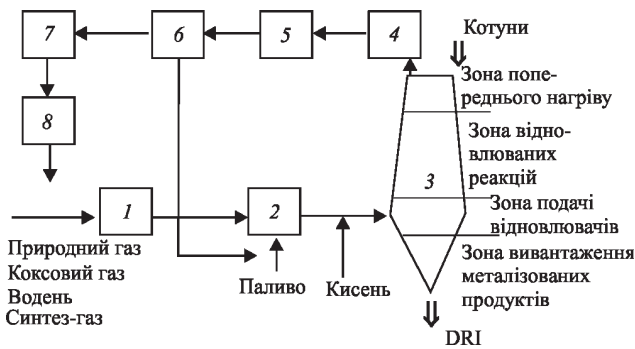
Очевидно, що охолодження DRI при вивантаженні з шахтної печі і його повторне нагрівання у сталеплавильній печі призводить до зайвих енергетичних, економічних та ресурсних витрат. Тому на деяких металургійних заводах, які у своєму складі мають як шахтні відновлювальні, так і дугові сталеплавильні печі, було впроваджено вивантаження гарячого DRI — Hot Direct Reduction Iron (HDRI) [5]. У результаті крім зменшення питомої витрати

електроенергії спостерігається підвищення продуктивності сталеплавильних печей до 20 % [12]. Це відбувається тому, що для нагрівання DRI до температури плавлення потрібно менше енергії та часу, що призводить до скорочення загального циклу плавлення. Емпіричне правило показує, що споживання електроенергії зменшується приблизно на 20 кВт·год/т рідкої сталі на кожні 100 °C підвищення температури DRI. Таким чином, економія при температурі DRI понад 600 °C може становити 120 кВт·год/т. Додатковими перевагами, крім економії електроенергії, є зниження витрати електродів, футерівки ДСП і можливість використання менш потужного електрообладнання. Зменшення енергетичних витрат у свою чергу призводить до зменшення забруднення довкілля. У 2023 р. доля HDRI склала близько 11 % від виробництва DRI [4].

Залежно від особливостей підприємства для транспортування HDRI до сталеплавильного цеху можуть застосовуватися конвеєри (на відстань до 200 м), транспортувальні ємності (на відстань понад 100 м) або, якщо відстань до 40 м, спеціалізовані системи, наприклад HOTLINK [5]. Остання передає HDRI з температурою до 700 °C у сусідню ДСП завдяки розміщенню шахтної печі MIDREX над зовнішньою стіною сталеплавильного цеху. HDRI скидається в гарячому вигляді в резервуар, а потім подається безпосередньо в ДСП з мінімальними тепловтратами. Транспортування HDRI відбувається завдяки силі тяжіння. Через герметичність HOTLINK системи не відбувається повторного окиснення HDRI. HOTLINK система розроблена з урахуванням можливості вивантаження HBI або CDRI, якщо у даний момент ДСП не потребує HDRI, без зупинки виробництва [12].

Узагальнена схема виробництва DRI представлена на рисунку.

Відновлювальні газу (коксовий газ, продукти газифікації вугілля, природний газ або продукти його конверсії, водень) подаються у зволожувач 1 (водяна пара використовується для конверсії вуглеводнів). Далі у нагрівачі 2 відбувається нагрів газової суміші до необхідної температури. Нагріті газу подаються у шахтну піч 3 для використання у відновлювальних процесах. Можливе додавання кисню у газову суміш перед шахтною піччю для ще більшого підвищення її температури. Газу, які виходять з шахтної печі, спочатку проходять через



Технологічна схема виробництва DRI: 1 — зволожувач; 2 — нагрівач; 3 — шахтна піч; 4 — теплообмінник; 5 — фільтрувальна система; 6 — устаткування для видалення води; 7 — компресори; 8 — устаткування для видалення CO₂

теплообмінник 4 для ефективного використання теплової енергії. Далі у фільтрувальній системі 5 відбувається очищення газів переважно від залізорудного пилу. На наступному етапі 6 при охолодженні відбувається видалення води. Далі частина газів може використовуватися як паливо для нагріву суміші відновлювальних газів, а частина за допомогою компресорів 7 відправляється на видалення вуглекислого газу 8. Після цього газова суміш містить переважно відновлювальні гази і повторно використовується у відновлювальних процесах.

Наведена схема є узагальненою і може відрізнятися залежно від технологічних особливостей на конкретному підприємстві. Зокрема, при використанні водню у якості відновника відсутні стадії зволоження 1 та видалення вуглекислого газу з відпрацьованого 8.

Як зазначалося вище, існує багато способів виробництва водню, і найбільш привабливим з екологічної точки зору є використання для відновлювальних процесів H₂, одержаного шляхом електролізу води. Але, говорячи про екологічність, треба враховувати викиди вуглекислого газу при виробництві необхідної для електролізу електроенергії. Так, автори роботи [6] визначили орієнтовну кількість вуглекислого газу, утвореного при виробництві DRI за різного співвідношення природного газу (ПГ) і водню у суміші відновлювальних газів при різних способах виробництва

електроенергії і зробили наступні припущення: витрата електроенергії на виробництво 1 кг водню шляхом електролізу становить 56 кВт·год; при виробництві електроенергії з відновлювальних джерел або на атомних електростанціях викиди вуглекислого газу становлять 20 г на 1 кВт·год, при спалюванні природного газу — 490 г на 1 кВт·год, при спалюванні вугілля — 820 г на 1 кВт·год.

Результати цих досліджень наведено у табл. 2 [6].

Таким чином, використання водню у якості відновника при виробництві DRI у шахтних печах дозволяє скоротити викиди вуглекислого газу вдвічі за умови генерації електроенергії на атомних або зелених електростанціях, тобто при використанні рожевого або зеленого водню. З іншого боку, використання електроенергії теплових електростанцій навпаки призведе до істотного збільшення викидів вуглекислого газу. Також слід розуміти, що наведені розрахунки мають місце при роботі підприємства за поданою на рисунку схемою, тобто за умови повторного використання газів, що виходять з шахтної печі.

Очевидно, що зменшення викидів вуглекислого газу у металургії забезпечується при скороченні споживання електроенергії на будь-якій ланці виробництва сталі. Як було сказано вище, істотної економії електроенергії можна досягти завдяки одержанню HDRI.

Іншим шляхом зменшення викидів вуглекислого газу у металургії може бути застосування плазмових технологій. Зокрема, можливе відновлення заліза у розплаві у плазмовій печі при використанні відновлювальних газів, у тому числі і водню [1, 13], або навіть термічне розкладання оксидів заліза [14]. Гарячі відновлювальні гази, що виходитимуть за таких умов із плазмових печей, можна використовувати або безпосередньо для відновлення заліза у шахтних печах, або для підігріву відновлювальних газів, спрямованих у шахтні печі. Але наразі такі рішення ще потребують подальших досліджень як у галузі плазмових технологій, так і в інтеграції плазмових технологій у відновлення заліза в шахтних печах.

Таблиця 2. Викиди CO₂ в залежності від складу суміші відновлювальних газів і способу одержання електроенергії, кг CO₂ на 1 т DRI [6]

Газ	100 % ПГ			50 % ПГ + 50 % H ₂			20 % ПГ + 80 % H ₂		
	Атомна, зелена	ПГ	Вугілля	Атомна, зелена	ПГ	Вугілля	Атомна, зелена	ПГ	Вугілля
Безпосередні викиди при виробництві DRI	495	–	–	287	–	–	200	–	–
Викиди, пов'язані з використанням електроенергії:									
у процесі відновлення	2	50	84	2	45	75	2	42	71
при виробництві H ₂	0	0	0	31	754	1262	46	1114	1864
Сумарні викиди	495	545	579	320	1086	1624	248	1356	2135

Висновки

1. Основною групою технологій позадоменного відновлення заліза з рудної сировини є технології відновлення у шахтних печах. Водень, як складова відновлювальних газів, бере участь у відновлювальних процесах. З термодинамічної точки зору у цих технологіях можливе використання навіть чистого водню для відновлення заліза.

2. При виробництві DRI завдяки використанню водню можна скоротити вдвічі викиди вуглекислого газу у порівнянні з використанням природного, за умови виробництва електроенергії відновлювальними джерелами або на атомних електростанціях.

3. Використання плазових технологій відновлення воднем є перспективним шляхом зменшення викидів вуглекислого газу у металургії, але потребує подальших досліджень як технологічних особливостей процесу, так і конструкційних особливостей шахтних печей.

Список літератури/References

1. Isnaldi, R. Souza Filho, Hauke Springer et al. (2022) *Green steel at its crossroads: Hybrid hydrogen-based reduction of iron ores*. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2201/2201.13356.pdf>
2. Giovannini, S. (2020) *50 shades of (grey and blue and green) hydrogen puzzled by all the colours and argon? This article is for you*. Energy Cities. <https://energy-cities.eu>
3. Kolisnichenko, V. (2023) Global production of cast iron grew by 1.1 % in 2023. <https://gmk.center.ua/news/globalne-virobnictvo-chavunu-u-2023-roci-zroslo-na-1-1-r-r/>
4. (2023) *World Direct Reduction Statistics*. <https://www.midrex.com/wp-content/uploads/MidrexSTATSBook2023.pdf>
5. *The MIDREX Process — The world's most reliable and productive Direct Reduction Technology*. https://www.midrex.com/wp-content/uploads/Midrex_Process_Brochure_4-12-18.pdf
6. Pauluzzi, D., Giraldo, A.H., Zugliano, A. et al. (2021) *CFD Study of an Energiron Reactor Fed With Different Concentrations of Hydrogen*. AISTech Iron & Steel Technology. https://www.energiron.com/wp-content/uploads/2021/09/MARCH-2021_AIST-IRON-STEEL-TECHNOLOGY.pdf
7. Pauluzzi, D., Martinis, A. Sustainable decrease of CO₂ Emissions in the Steelmaking Industry by Means of the Fine Ore Direct Reduction Circored Energiron Direct Reduction Technology. https://www.researchgate.net/publication/329059091_SUSTAINABLE_DECREASE_OF_CO2_EMISSIONS_IN_THE_STEELMAKING_INDUSTRY_BY_MEANS_OF_THE_ENERGIRON_DIRECT_REDUCTION_TECHNOLOGY
8. <https://www.metso.com/globalassets/pdfs-and-other-downloads/circored---fine-ore-direct-reduction.pdf>
9. Pochtariov, O.V. (2024) *Improvement of technological means of quality control of iron ore raw materials in underground mining*: Syn. of Thesis for PhD. Kryvorizh. Nats. Un-t. Kryvyi Rig.
10. Bondarenko, B.I., Shapovalov, V.A., Garmash, N.I. (2003) *Theory and technology of coke-free metallurgy*. Kyiv, Naukova Dumka
11. Gubin, G.V., Piven, V.O. (2010) *Modern commercial methods of iron coke-free metallurgy*. Kryvyi Rig.
12. Hotlink System. Benefits of Charging Hot Dri (HDRI). https://www.midrex.com/wp-content/uploads/Hot_Transport_-_HOTLINK.pdf
13. Zhyrov, D.M. (2011) *Peculiarities of the plasma-arc liquid-phase reduction of iron with gases*: Syn. of Thesis for Cand. of Tech. Sci. Degree. Kyiv, PWI.
14. Mogylatenko, V.G., Shapovalov, V.O., Biktagirov, F.K., Kozin, R.V. (2023) Thermal decomposition of hematite pellets during plasma-arc smelting in argon atmosphere. In: *Proc. of XVth Inter. Sci.-Tech. Conf. on New Materials and Technologies in Mechanical Engineering, 27–28 April 2023*. Kyiv, KPI, 23–29.
15. https://foundry.kpi.ua/wp-content/uploads/2023/06/conferenziya_2023.pdf

INDUSTRIAL TECHNOLOGIES FOR OUT-OF-BLAST FURNACE REDUCTION OF IRON FROM ORES AND PROSPECTS OF USING HYDROGEN FOR THE REDUCTION PROCESSES

V.O. Shapovalov¹, V.G. Mogylatenko^{1,2}, D.M. Zhyrov¹, V.R. Burnashev¹

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: shapovalov@paton.kiev.ua

²National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

37 Prospect Beresteyskiy, 03056, Kyiv, Ukraine. E-mail: vmogilatenko@gmail.com

Application of a mixture of carbon monoxide and hydrogen allows achieving a significant lowering of carbon dioxide gas emissions in metallurgy. Industrial technologies of out-of-blast furnace reduction of iron from ore raw materials are considered. Reactions in the reduction processes are analyzed. It is shown that at temperatures above 800 °C hydrogen is a more effective reducing agent than carbon monoxide. Ways to improve the energy efficiency of existing technologies have been demonstrated. It is shown that today the main technology of iron reduction from ore is reduction in shaft furnaces using a mixture of carbon dioxide and hydrogen. The generalized scheme of production of iron by direct reduction is given. It is shown that in the production of direct reduction iron, it is possible to halve carbon dioxide emissions compared to the use of natural gas due to application of hydrogen, provided that power is produced from renewable sources or in nuclear power plants. It is concluded that a promising way to eliminate carbon emissions during the reduction of iron from ore or pellets is the use of plasma technologies. 14 Ref, 2 Tabl., 1 Fig.

Keywords: direct reduction of iron, hydrogen, shaft furnace, carbon dioxide emissions

Отримано 26.05.2025

Отримано у переглянутому вигляді 25.06.2025

Прийнято 12.07.2025

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВУ НЕРЖАВІЮЧОЇ СТАЛІ AISI 304 ПІД РІЗНИМИ ФЛЮСАМИ

М.М. Ямшинський¹, М.С. Лавренюк¹, Д.І. Трикозенко²

¹НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

03056, м. Київ, Берестейський просп., 37. E-mail: yamshinskiy@ukr.net

²ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: dan2002@ukr.net

Розглянуто процес електрошлакового переплаву нержавіючої сталі AISI 304 під чотирма різними флюсами. Визначено продуктивність переплаву витратного електрода для кожного флюсу за однакової прикладеної потужності. Досліджено зміну хімічного складу шлаку після переплаву витратних електродів та розмір і кількість неметалевих включень в металі зливків після ЕШП під флюсами різного хімічного складу. Встановлено, що застосування різних флюсів суттєво впливає на якість отриманих зливків. Рекомендовано найкращий флюс серед досліджених для здійснення ЕШП нержавіючої сталі AISI 304. Найкращі показники щодо збереженого хімічного складу сталі та кількості неметалевих включень в ній досягнуто у зливку, отриманому після ЕШП під флюсом АНФ-7. Він мав найнижчий індекс забрудненості неметалевими включеннями та найменшу кількість оксидів металу в шлаці після переплаву. Метал зливка, отриманого після ЕШП під флюсом АНФ-1, показав гарні результати за індексом забрудненості неметалевими включеннями. Проте переплав під цим флюсом найбільше вплинув на вміст Si та Mn в металі. Бібліогр. 8, табл. 5, рис. 3.

Ключові слова: електрошлаковий переплав, витратний електрод, нержавіюча сталь, шлак, флюс, коефіцієнт заповнення, продуктивність переплаву, неметалеві включення, хімічний склад, зливок

Вступ. Електрошлаковий переплав є основним способом виготовлення високоякісних нержавіючих сталей, які використовуються в авіації, енергетиці, медицині та інших сферах. У процесі переплаву метал очищається від неметалевих включень, газів та сірки завдяки хімічним реакціям зі шлаком. Крім того, шлак захищає розплавлений метал від контакту з атмосферою, попереджаючи окислення. Краплі металу, проходячи крізь шлакову ванну, потрапляють у кристалізатор, що охолоджується водою, і формують металеву ванну. У кристалізаторі рідкий метал поступово кристалізується, утворюючи зливок із направленою кристалічною структурою. Між кристалізатором і зливком утворюється тверда кірка шлаку, яка забезпечує формування якісної поверхні зливка [1]. Електрошлаковий переплав (ЕШП) забезпечує помітне покращення характеристик матеріалів шляхом вирішення питань чистоти структури з достатньою економічною ефективністю. Однією з ключових переваг є видалення неметалевих включень і газів. Шлакова ванна, що переважно складається з CaO , SiO_2 , Al_2O_3 і CaF_2 , виконує роль рафінувального середовища, зменшуючи в металі вміст і розмір включень, а також сірки, що є критичним для металургійної якості зливка [2, 3].

ЕШП вимагає точного регулювання параметрів, таких як склад шлаку, прикладена потужність та швидкість плавлення. Зміни в складі шлаку, наприклад, через втрату летких компонентів або

реакції з електродом, можуть негативно вплинути на якість зливка. Для нержавіючих сталей, які містять легуючі елементи, це може призвести до нерівномірного розподілу або втрати цих елементів, що знижують корозійну стійкість [4].

Практика ЕШП високолегованих сталей має тривалу історію успішного застосування в металургії спеціальних і відповідальних конструкційних матеріалів. Цей процес широко використовується для виготовлення зливків із покращеними характеристиками чистоти, однорідності структури та механічних властивостей, особливо в аерокосмічній, енергетичній та оборонній галузях. Відомо, що саме ЕШП дозволяє суттєво знизити вміст неметалевих включень, вирівняти розподіл легувальних елементів у зливку та отримати щільну структуру металу, що забезпечує високі експлуатаційні характеристики матеріалу [5–7].

Однак ефективність процесу ЕШП значною мірою залежить від хімічного складу та фізико-хімічних властивостей флюсу, який виконує функції електропровідного середовища та багатьох інших параметрів. Тому дослідження впливу різних флюсів на перебіг процесу плавлення, термодинамічну рівновагу між шлаком і металом, а також на мікроструктурні та якісні характеристики отриманих зливків є надзвичайно актуальними.

Зважаючи на викладене, доцільним є проведення системного дослідження флюсів з варіативним вмістом оксидів кальцію, алюмінію, кремнію, фто-

М.М. Ямшинський — <https://orcid.org/0000-0002-2293-2939>, Д.І. Трикозенко — <https://orcid.org/0009-0008-7858-7581>

Таблиця 1. Хімічний склад сталі за стандартом AISI 304/EN 1.4301, %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Fe
до 0,07	до 0,75	до 2	до 0,04	до 0,03	18...19	8...10	Основа

ридів та інших компонентів, які можуть впливати на температуру плавлення, в'язкість та розчинність домішок. Таке дослідження дозволить не лише оптимізувати флюси під конкретні марки сталей, а й забезпечити цілеспрямоване керування процесами рафінування та кристалізації при ЕШП, що є запорукою отримання металу високої якості.

Постановка задачі дослідження. Метою даної роботи є встановлення впливу складу флюсів на режим переплаву та хімічний склад зливоків нержавіючої сталі AISI 304, отриманих способом електрошлакового переплаву. Дослідити зміну хімічного складу як шлаку, так і металу та визначити зміни неметалевих включень в між вхідним металом витратного електрода та металу зливоків.

Методика досліджень. Плавку здійснювали у водоохолоджуваному кристалізаторі на лабораторній печі електрошлакового переплаву УШ-114.

Джерелом живлення УШ-114 є зварювальний трансформатор змінного струму з падаючою характеристикою та загальною потужністю 90 кВА (60 В, 1500 А).

Для дослідження використовували електроди марки AISI 304 (табл. 1) діаметром 30 мм і довжиною 450 мм. Коефіцієнт заповнення кристалізатора при цьому складає 0,36.

Висота внутрішньої порожнини водоохолоджуваного кристалізатора, що визначає максимально можливу висоту зливка, складає 200 мм. Діаметр внутрішньої порожнини у основи становить 55, на вершині 50 мм.

Для порівняльної оцінки ефективності впливу різних флюсів на перебіг переплаву та якість отриманого металу було відібрано чотири різні флюси, що є типовими для електрошлакового переплаву конструкційних і нержавіючих сталей: АНФ-1, АНФ-7, АНФ-28 та експериментальний флюс умовного позначення 3/3/3, хімічний склад яких наведено в табл. 2. Ці флюси відрізняються за хімічним складом, що дозволяє оцінити вплив основності та термохімічної активності шлаку

Таблиця 2. Усереднений хімічний склад флюсів, що використовували в експериментах, мас. %

Флюс	CaF ₂	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO
АНФ-1	93	5	–	2	–
АНФ-7	73	25	–	2	–
АНФ-28	30	10	20	35	5
3/3/3	33	33	30	3	1

на кінетику плавлення, ступінь рафінування та структурні характеристики зливоків.

Таким чином, вибрані флюси забезпечують репрезентативну вибірку для дослідження впливу шлакових систем на результати електрошлакового переплаву сталі типу AISI 304 у різних умовах. Кількість флюсу для кожної плавки становила 250 г. Така кількість обумовлена тим, що висота шлакової ванни має становити близько 40 мм і щоб її опору було достатньо для протікання ЕШП.

Дослідження хімічного складу металу, флюсів та шлаків виконували на рентгенофлуоресцентному аналізаторі «Xrf express analyzer inam expert 4l». Дослідження неметалевих включень на оптичному мікроскопі «Carl Zeiss» та скануючому електронному мікроскопі «Sem Tescan vega 3».

Результати досліджень та їх обговорення. В результаті проведених експериментів було отримано чотири зливки (рис. 1). Вони мають різну якість поверхні, що обумовлено різними властивостями шлаків.

Плавлення витратного електрода в кожному експерименті здійснювали з підтриманням стабільного електричного режиму. Оскільки кожен із застосованих флюсів має характерне електрофізичне середовище, зокрема, різне значення питомого електричного опору у розплавленому стані, це безпосередньо впливає на тепловий баланс системи та швидкість переплаву. Відомо, що електричний опір флюсу визначає величину тепловиділення в об'ємі шлакової ванни під час проходження струму, що, у свою чергу, формує температурні умови плавлення електрода та кристалізації металу.



Рис. 1. Зливки, отримані в результаті плавок під різними флюсами: а — АНФ-1; б — АНФ-7; в — АНФ-28; з — 3/3/3

Таблиця 3. Хімічний склад шлаків після переплаву, мас. %

Шлак	CaF ₂ + CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	MnO	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
АНФ-1	89,93	–	3,54	0,89	2,38	1,89	1,37
АНФ-7	87,61	–	2,36	0,90	0,98	1,46	0,59
АНФ-28	66,01	18,66	8,46	2,58	2,20	1,78	0,31
3/3/3	64,70	26,07	3,20	1,06	1,86	2,37	0,74

З урахуванням цих параметрів було виконано розрахунок продуктивності процесу наплавлення зливка для кожного із чотирьох флюсів. Розрахунок здійснювали на основі експериментальних даних щодо часу повного переплаву електрода, маси отриманого зливка та фіксованих електротехнічних характеристик (струм та напруга), кг/год: АНФ-1 = 14,8; АНФ-7 = 17,3; АНФ-28 = 16,1; 3/3/3 = 27,3.

Отримані результати продемонстрували помітну залежність продуктивності процесу від складу флюсу. Зокрема, флюси з вищим електричним опором (наприклад 3/3/3) забезпечували вищу температуру шлакової ванни, що сприяло швидшому переплаву електрода, натомість флюси з нижчим опором (як-от АНФ-1) характеризувалися зниженою питомою продуктивністю.

Таким чином, виконаний розрахунок дозволив кількісно оцінити вплив фізико-хімічних властивостей флюсів на ефективність ЕШП, а також забезпечив підґрунтя для подальшої оптимізації параметрів процесу залежно від поставлених технологічних завдань.

З метою оцінки змін у складі флюсів в процесі ЕШП було проведено визначення їх хімічного складу після завершення процесу. Отримані результати наведено в табл. 3.

Варто зазначити, що аналіз проводився із використанням рентгенофлуоресцентного аналізатора, який дозволяє визначати вміст елементів лише у вигляді їх оксидних форм. У зв'язку з цим фториди, зокрема CaF₂, не можуть бути точно ідентифіковані. Тому, у таблиці концентрація оксиду кальцію (CaO) представлена у сукупності з фторидами кальцію, тобто як умовна сумарна частка CaO + CaF₂, яка в подальшому розглядається лише як оціночна величина загального вмісту кальцію в шлаковій фазі.

Такий підхід дозволяє здійснити порівняльний аналіз з урахуванням обмежень застосованого ме-

Таблиця 4. Хімічний склад сталі AISI 304 після переплаву, мас. %

Флюс	Si	Mn	Cr	Ni	Fe
АНФ-1	0,36	1,48	19	8	Основа
АНФ-7	0,66	1,66	18,16	8,05	—»—
АНФ-28	0,61	1,6	18,26	8,19	—»—
3/3/3	0,71	1,65	18,12	8,24	—»—

туди, а також простежити тенденції зміни складу шлаку залежно від умов переплаву та ступеня участі компонентів у шлакометалевій взаємодії.

Оцінити вплив шлаку на хімічний склад металу можна за кількістю оксидів металів, таких як MnO, Cr₂O₃, Fe₂O₃, які спостерігаються в ньому після переплаву. Відсоток, що становлять відповідні оксиди металу після переплаву під різними флюсами складає, %: під АНФ-1 = 5,64; АНФ-7 = 3,03; АНФ-28 = 4,29; 3/3/3 = 4,97. Згідно цих даних можна стверджувати, що ЕШП під флюсом АНФ-7 найменше впливає на окислення металів під час переплаву досліджуваної сталі.

Хімічний склад металу після ЕШП представлено в табл. 4. Аналіз проводили із застосуванням методу рентгенофлуоресцентної спектроскопії, який забезпечує надійне визначення основних легувальних та супутніх елементів. Водночас, через обмеження методики, елементи, що входять до складу у вигляді легколетких або неметалевих сполук, зокрема вуглець, сірка та фосфор, не були визначені.

Однак їх концентрації у сталі типу AISI 304 є незначними та жорстко нормованими, тому відсутність даних щодо вмісту С, S та Р не впливає на репрезентативність поданої інформації та не змінює висновків щодо ефективності електрошлакового рафінування. Крім того відомо, що електрошлаковий переплав не змінює кількість вуглецю в розплаві металевій ванни. Таким чином, можна вважати, що отримані результати дозволяють провести коректну оцінку змін у складі основних легувальних компонентів та зробити висновки про рафінувальні властивості використаних флюсів.

Отримані дані свідчать про те, що всі зливки після ЕШП відповідають за хімічним складом стандарту AISI 304/EN 1.4301. З супутніх компонентів в цій сталі є Si та Mn, сильніше за всіх на них вплинув флюс АНФ-1, що свідчить про його високу реакційну здатність. Це підтверджується

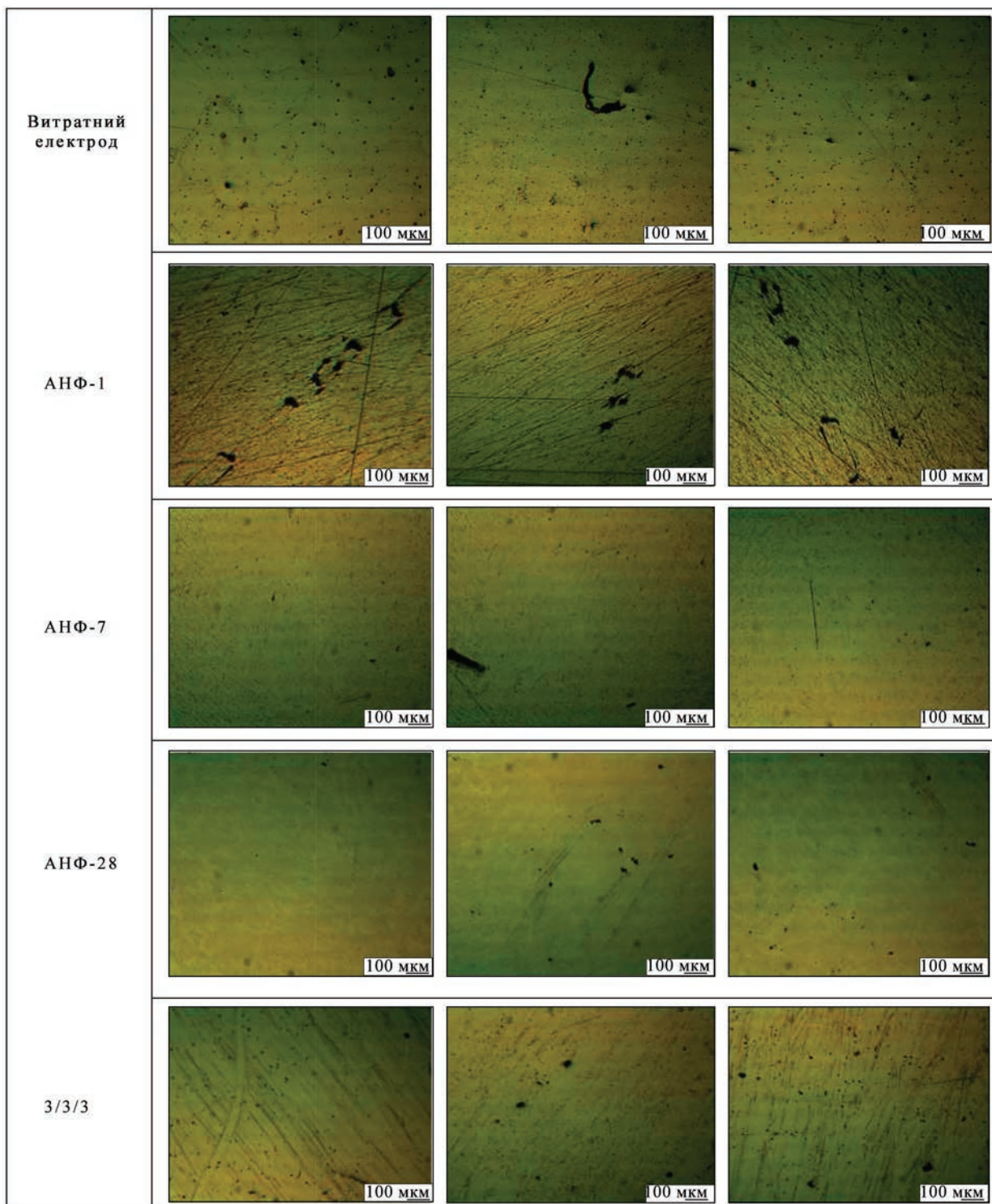


Рис. 2. Неметалеві включення в металі витратного електрода і зливоків, виплавлених під різними флюсами. Дослідження проводили в центральній, середній та зовнішній частинах зливка — відповідно ліва, центральна та права колонки

Таблиця 5. Загальний індекс забрудненості металу зразків

Марка флюсу									
АНФ-1	0,0032	0,0020	0,0020	0,0019	0,0004	0	0	0	0,0095
АНФ-7	—»—	0,0005	0,0009	0,003	—»—	—»—	—»—	—»—	0,008
АНФ-28	0,0059	0,0017	0,0016	0,0007	0,0008	—»—	—»—	—»—	0,01
3/3/3	0,0085	0,0029	0,0018	0,0011	0,0009	—»—	—»—	—»—	0,015
Вихідний зразок	0,01	0,0037	0,002	0,0016	0	0,0009	—»—	0,0009	0,0191

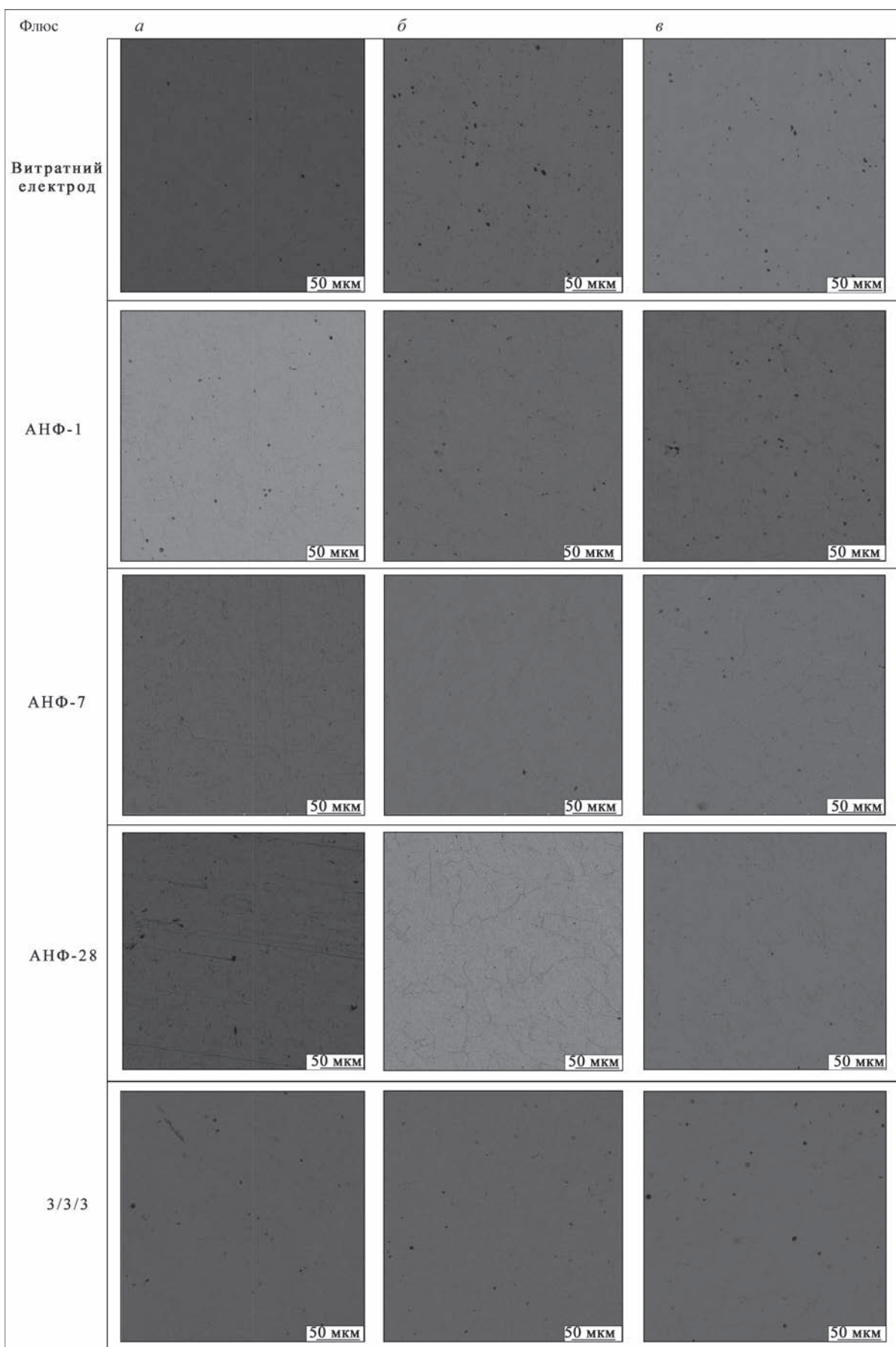


Рис. 3. Мікструктуру досліджуваних зразків проводили в центральній, середній та зовнішній частинах зливка — відповідно ліва, центральна та права колонки

наявністю в ньому найбільшої кількості оксидів металів, таких як MnO , Cr_2O_3 , Fe_2O_3 , їх сума найбільша серед досліджуваних та складає для АНФ-1 = 5,64 %.

Вимірювання розмірів неметалевих включень вздовж горизонтальних та вертикальних ліній шліфів виконували згідно ДСТУ ISO 4967:2017 [8]. Відповідно до цього методу, визначення розмірів неметалевих включень для розрахунку індексу забрудненості для литих металів здійснювали методом лінійного підрахування на нетравлених шліфах.

Досліджувані зразки відбирали з центральної частини зливка та представлені на рис. 2.

З отриманого розрахунку індексу забрудненості неметалевими включеннями за методикою ДСТУ ISO 4967:2017 [8] було встановлено, що найнижчий загальний індекс забрудненості спостерігається у другого зразка (АНФ-7, табл. 5), що свідчить про найменшу кількість великих включень та високу чистоту металу. Найвищий загальний індекс забрудненості має вихідний метал. В ньому спостерігались включення розміром до 140 мкм, які мають значний вплив на якість металу. Найменший індекс забрудненості показав метал, переплавлений під флюсом АНФ-7.

Наступним етапом було дослідження мікроструктури дослідного металу за допомогою скануючого електронного мікроскопа (рис. 3).

У всіх трьох зонах видно рівномірну структуру із дрібними зернами. Центральна та середня частини мають однакову морфологію. Включення розподілені рівномірно. Характеризується дрібнозернистою структурою з відсутністю макропористості. На мікроструктурі зразків чітко видно різницю між центральною та периферійною зонами. У зразках, отриманих із флюсами АНФ-1 та АНФ-7, переважає дрібнозерниста структура з однорідним розподілом фаз.

Вихідний зразок до ЕШП був найгірший: велика кількість включень, мікротріщин, грубозерниста структура і найвищий індекс забрудненості.

Проведене дослідження підтверджує високу ефективність ЕШП як технології рафінування нержавіючих сталей, зокрема AISI 304. Застосування ЕШП дозволило досягти суттєвого покращення металургійної чистоти, зменшення кількості неметалевих включень, покращення макро- та мікроструктури металу, а також забезпечення рівномірного розподілу легувальних елементів за перерізом зливка. Результати випробувань підтверджують, що ЕШП сприяє стабілізації хімічного складу та зниженню впливу шкідливих домішок,

які погіршують корозійну стійкість і механічні властивості сталі.

Порівняльний аналіз ефективності чотирьох флюсів показав, що саме флюс АНФ-7 забезпечив оптимальний баланс між продуктивністю плавлення витратного електрода, рафінувальною здатністю шлаку і стабільністю електротехнічних параметрів та ефективним видаленням неметалевих включень. Також зафіксовано найкращі показники однорідності структури саме під час застосування флюсу АНФ-7.

З урахуванням отриманих результатів рекомендується використовувати флюс АНФ-7, як пріоритетний для електрошлакового переплаву сталей типу AISI 304, з метою підвищення якості металопродукції, зниження втрат легувальних елементів та забезпечення стабільного протікання технологічного процесу ЕШП.

Висновки

В результаті проведених експериментів було встановлено, що застосування різних флюсів суттєво впливає на якість отриманих зливоків. Найкращі показники щодо хімічної чистоти та найменшої кількості неметалевих включень показав зразок зі зливка, отриманого ЕШП під флюсом АНФ-7. Він мав найнижчий індекс забрудненості та найменшу кількість оксидів металу в шлаці після переплаву. Зразок зі зливка, отриманого ЕШП під флюсом АНФ-1, показав схожі результати по індексу забрудненості неметалевими включеннями та найбільший вплив на вміст Si і Mn в металі.

Список літератури/References

1. Paton, B.E., Lipinsky, V.A. (1973) *Electroslag remelting: Theory and practice*. Kyiv, Naukova Dumka.
2. Isaenko, V.P. (1992) *Technology of electroslag remelting of steels*. Kyiv, PWI.
3. Kurylo, P.Ya. (2007) *Electroslag remelting: Textbook*. Lviv, Lviv Polytechnic Publishing House.
4. Novikov, I.I., Zhukov, V.I. (1983) *Metallurgy of welding production*. Moscow, Mashinostroenie.
5. Pedchenko, Ye., Kostetsky, Yu., Polishko, G. et al. (2023) Recycling of steel using the ESR method in the conditions of limited resources of raw materials to preserve the chemical composition and properties. In: *Proc. of Inter. Young Scientists Conf. on Modern Problems of Materials Science, 27–29 September, 2023, Lviv*. DOI: <https://doi.org/10.15407/msse2023.047>
6. Pedchenko, Ye.O., Kostetsky, Yu.V., Petrenko, V.L., Medovar, L.B. (2022) Recycling of used non-compact high-speed steel tools by electroslag remelting. *Suchasna Elektrometalyrhiya*, 3, 23–28 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2022.03>.
7. Pedchenko, Ye., Medovar, L., Kostetsky, Yu., Petrenko, V. (2022) Electroslag remelting as a method of recycling non-compact high-speed steel tools. In: *Proc. of 31st Inter.*

INVESTIGATIONS OF ESR OF AISI 304 STAINLESS STEEL UNDER DIFFERENT FLUXES

M.M. Yamshynskiy¹, M.S. Lavreniuk¹, D.I. Trykozenko²

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute».

37 Prospect Beresteyskiy, 03056, Kyiv, Ukraine. E-mail: yamshinskiy@ukr.net

²E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: dan2002@ukr.net

The process of electroslag remelting (ESR) of AISI 304 stainless steel under four different fluxes is considered. The remelting performance of the consumable electrode was determined for each flux at the same applied power. Changes in the slag chemical composition after consumable electrode remelting were analyzed. The size and quantity of non-metallic inclusions in the ingot metal after ESR under fluxes of different chemical compositions were investigated. It was established that choice of flux has a significant impact on the quality of the resulting ingots. The most effective flux among the studied compositions is recommended for ESR of AISI 304 stainless steel. The best indices of preservation of the steel chemical composition and the quantity of non-metallic inclusions in it were achieved in the ingot produced by ESR under ANF-7 flux. It had the lowest index of contamination by non-metallic inclusions and the smallest quantity of metal oxides in the slag after remelting. The metal of the ingot produced by ESR under ANF-1 flux also showed good results by the index of contamination by the non-metallic inclusions. However, remelting under this flux influenced Si and Mn content in the metal to the greatest extent. 8 Ref., 5 Tabl., 3 Fig.

Keywords: electroslag remelting; consumable electrode, stainless steel, slag, flux, filling coefficient, remelting productivity, non-metallic inclusions, chemical composition, ingot

Отримано 01.06.2025

Отримано у переглянутому вигляді 30.07.2025

Прийнято 07.08.2025



РОЗРОБЛЕНО В ІЕЗ

РОБОТИЗОВАНИЙ КОМПЛЕКС

для модифікації поверхні виробів широкого функціонального призначення
із застосуванням плазмових, лазерних і гібридних технологій

Обробка прямою
плазмовою дугою
з магнітним управлінням

Плазмово-іскрове
легування
(мікронаплавлення)

Лазерно-плазмова
модифікація + плазмово-
іскрове легування

Лазерна модифікація
і хіміко-термічна
обробка

