

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Запорізький національний університет

МЕТАЛУРГІЯ

2020

Випуск 1



Видавничий дім
«Гельветика»
2020

*Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації
серія КВ № 23926-13766ПР від 23.04.2019 р.*

*Друкуються за рішенням Вченої ради Запорізького національного університету
(протокол № 4 від 24.11.2020 р.)*

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Скачков В.О., д-р техн. наук, професор (Запорізький національний університет, м. Запоріжжя), **головний редактор**

Бережна О.Р., канд. техн. наук, доцент (Запорізький національний університет, м. Запоріжжя, Україна)

Бурбелко А.О., д-р техн. наук, професор (AGH University of Science and Technology Faculty of Foundry Engineering, м. Краків, Польща)

Верховлюк О.М., д-р техн. наук, професор (Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАНУ, м. Київ, Україна)

Гіржон В.В., д-р фіз.-мат. наук, професор (Запорізький національний університет, м. Запоріжжя, Україна)

Григор'єв С.М., д-р техн. наук, професор (Запорізький національний університет, м. Запоріжжя, Україна)

Гридин О.Ю., д-р техн. наук, професор (Падеборнський університет, м. Падеборн, Німеччина)

Гришак В.З., д-р техн. наук, професор (Запорізький національний університет, м. Запоріжжя, Україна)

Критська Т.В., д-р техн. наук, професор (Запорізький національний університет, м. Запоріжжя, Україна)

Луньов В.В., д-р техн. наук, професор (Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна)

Максименко А.Л., д-р техн. наук, ст. наук. співробітник (Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, м. Київ, Україна)

Пазюк М.Ю., д-р техн. наук, професор (Запорізький національний університет, м. Запоріжжя, Україна)

Панов В.С., д-р техн. наук, професор (Національний дослідний технологічний університет «МІСіС», м. Москва, Росія)

Рудь В.Д., д-р техн. наук, професор (Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна)

Терновий Ю.Ф., д-р техн. наук, професор (Запорізький національний університет, м. Запоріжжя, Україна)

Фролов Г.О., д-р техн. наук, ст. наук. співробітник (Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, м. Київ, Україна)

Чейлитко А.О., д-р техн. наук, доцент (Запорізький національний університет, м. Запоріжжя, Україна)

Відповідальні секретарі:

Воляр Р.М., канд. техн. наук, доцент

Воденнікова О.С., канд. техн. наук, доцент

Веб-сайт видання: <http://metal.journalsofznu.zp.ua>

Збірник включений до Переліку наукових фахових видань України, **категорія «Б»** зі спеціальностей 131, 132, 133, 134, 135, 136 (наказ МОН України від 02.07.2020 № 886).

М 540 **МЕТАЛУРГІЯ** / Гол. ред. В. О. Скачков. – Запоріжжя: ЗНУ, 2020. – Вип. 1. – 132 с.

ISSN 2071-3789

Розглянуто теоретичні й технологічні проблеми чорної та кольорової металургії: підготовка залізорудної шихти, удосконалення сталеплавильного виробництва, одержання дисперсних порошків карбідів металів IV-VI груп з іонних розплавів, а також вилучення та переробка літійу й інших металів зі скрапу відпрацьованих літєвих акумуляторів. Обговорено питання одержання вуглецевих композитів, металургійної теплотехніки, прокатного виробництва, автоматизації виробничих процесів, механічного обладнання металургійних підприємств, сучасного стану та прогнозів розвитку світового та українського ринку нанопорошків, а також охорони праці у металургії.

Збірник призначений для наукових і науково-педагогічних працівників, аспірантів і студентів металургійних спеціальностей закладів вищої освіти, інженерно-технічних працівників металургійної галузі.

Лл. 32. Табл. 18. Бібліогр. 240 назв.

ЗМІСТ

Колобов Г.О., Панова В.О., Нестеренко Т.М., Кириченко О.Г., Румянцев В.Р., Бережна О.Р. Сучасний стан і прогноз розвитку світової титанової промисловості на період до 2024 року (Повідомлення 4).....	5
Харченко О.В., Лічконенко Н.В. Теплові ефекти вторинного електротермічного легування та рафінування сталі.....	11
Терновий Ю.Ф., Баглюк Г.А., Панова В.О. Одержання порошків підвищеної плинності розпиленням металевих розплавів водою високого тиску за умов подвійного повітряно-водяного смерчу (Повідомлення 2)	19
Терновий Ю.Ф., Лічконенко Н.В. Про вплив температури газу та розплаву на розмір мікрогранул за газовим розпиленням	27
Середа Б.П., Муковська Д.Ю. Головні аспекти рециклінгу відходів металургійних підприємств на прикладі промисловості півдня України	36
Sereda V.P., Khina V.B., Kruglyak I.V. Thermodynamic analysis of the gas medium in the formation of diffusion coating using composite saturating charges.....	43
Sereda V.P., Volokh V. I. Formation of low-carbon wire rod structure under shs conditions using magnetic coercimetric control	50
Скідін І.Е., Воденнікова О.С., Воденніков С.А., Саїтгарєєв Л.Н., Бабошко Д.Ю. Про розрахунки процесу формування шару термітного сплаву на сталевій підкладці за СВС-процесом	55
Скачков В.О., Карпенко Г.В., Румянцев В.Р., Куріс Ю.В., Мосейко Ю.В., Мовчан В.Л. Дослідження процесу осадження багатокомпонентної суспензії під час одержання вуглецевих композитів з низькою щільністю ...	63
Чернявська Т.В. Властивості епоксидних композитів, наповнених фітиновою кислотою	70
Поліщук В.М., Бровкін В.Л., Радченко Ю.М., Воробйова Л.О. Двовимірна фізична модель правлення безперервнолитого сляба криволінійної МБЛЗ.....	76
Коваленко В.Л., Артемчук В.В., Левченко С.А., Башлій С.В. Економічні та технологічні аспекти використання біогазових сумішей в умовах промислових підприємств	84

Зінченко В.Ю., Іванов В.І., Нестеренко Т.М., Каюков Ю.М. Розробка імітаційної моделі теплопровідності для автоматизованих систем управління термічними печами.....	91
Каюков Ю.М., Іванов В.І., Рижков В.Г., Назаренко І.А. До обчислення спряженого теплообміну в полуменевих печах камерного типу	97
Биткін С.В., Критська Т.В. Методика статистичної оцінки результатів технологічного експерименту в чорній металургії у середовищах «STATISTICA» та «MathCAD»	103
Чейлитко А.О., Ільїн С.В., Лаврьонов А.В., Бєлоконь Ю.О. Дослідження характеристик циклону для сухого очищення газів від пилу в металургії. 110	
Тарасов В.К., Воденнікова О.С., Воденніков С.А., Лисенко Є.І., Макушина М.М. Дослідження ефективності використання бортових відсмоктувачів травільних ванн.....	118
Рижков В.Г., Бєлоконь К.В., Манідіна Є.А., Троїцька О.О., Радченко Ю.М. До розрахунку вентиляції виробничих приміщень за умов виділення декількох шкідливих речовин.....	125

УДК 638.45:669.295

DOI <https://doi.org/10.26661/2071-3789-2020-1-01>

Колобов Герман Олександрович, професор-консультант, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0003-4593-0562

Панова Віра Олегівна, старший інженер технічного відділу, ВАТ «Запорізький титаномагнієвий комбінат», Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0001-81-251X

Нестеренко Тетяна Миколаївна, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0001-7900-8512

Кириченко Олексій Геннадійович, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-3032-1919

Румянцев Владислав Ростиславович, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0003-3182-2536

Бережна Ольга Русланівна, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0001-6728-5221

СУЧАСНИЙ СТАН І ПРОГНОЗ РОЗВИТКУ СВІТОВОЇ ТИТАНОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ НА ПЕРІОД ДО 2026 РОКУ

Повідомлення 4. Феротитан

Описано сучасний стан світових потужностей з виробництва феротитану. Проаналізовано вимоги споживачів до сортів феротитану. Вказано ринки та обсяги споживання титанвмісної продукції, одержаної з його використанням. Розглянуто ситуацію з міжнародною торгівлею феротитаном, Вказано головні експортери та імпортери, а також обсяги та напрями експорту й імпорту. Подано прогноз до 2026 р. у частині попиту на феротитан за сферами застосування, а також рівня цін.

Ключові слова: феротитан, виробничі потужності, торгівля, експорт та імпорт, ціни, прогноз

Вступ. Дана публікація, що присвячена феротитану, завершує серію статей, об'єднаних загальною темою «Сучасний стан і прогноз розвитку світової титанової промисловості на період до 2026 року» [1-5].

Вперше феротитан було одержано в 1798 р. методом сплавлення залізного та титанового брухту з масовою долею останнього від 25 до 70%. Нині такий матеріал є головним видом титанової продукції, його додають до сталі для легування її титаном [6-11].

Світові виробничі потужності та технології одержання [12]. Головна частина світових потужностей з виробництва феротитану становить біля 100 тис. т/год. і зосереджена у Великій Британії, Російській Федерації та КНР. Виробництво феротитану у Великій Британії, яке базується на використанні відходів, що імпортують, і Російській Федерації призначено, в основному, для експорту, тоді як у КНР, головним чином, для внутрішнього використання. У 2016 г. Велика Британія була, ймовірно, найкрупнішим виробником, хоча вважається, що Російська Федерація має більші виробничі потужності.

Російська Федерація на чотирьох підприємствах виробляє 26,8 тис. т/рік феротитану, КНР – 19,6 тис. т/рік, Велика Британія – більше ніж 31 тис. т/рік. З інших помітних виробників феротитану слід зазначити Естонію (експорт-імпорт), США та Україну.

Найбільшими виробниками феротитану у Великій Британії є компанії «*Tivac Alloys*», «*AMG Superalloys UK*» (виробляють 25 тис. т/рік легкоплавкого феротитану із застосуванням технології індукційної плавки суміші чистої титанвмісної сировини та низьковуглецевої сталі) і «*Mottram*» (виробляє 6 тис. т/рік 25, 40 і 70%-го феротитану). Компанія «*AMG Superalloys UK*» також виробляє спеціалізовані лігатури та покриття для аерокосмічної, енергетичної та спеціальної металургійної промисловості.

Найбільшими виробниками феротитану у Російській Федерації є ВАТ «Корпорація ВСМПО-АВІСМА» (близько 10 тис. т/рік 65...75%-го феротитану за технологією індукційного та електрошлакового переплавлення) і ВАТ «Ключевський завод феросплавів «MIDURAL GROUP» (потужністю 10 тис. т/рік), що виробляє чотири марки феротитану: ФТИ70С5, ФТИ35С7, ФТИ35С8 і ФТИ25 у шматках масою не більше ніж 15 кг, розміром часточок до 230 мм з щільністю 6,0...6,2 г/см³ і температурою плавлення 1593...1773 К. Деякий обсяг виробництва феротитану у Російській Федерації замінено виробництвом компанії «Mast Europe OU» (Естонія), виробничі потужності якої оцінюються у 10 тис. т/рік.

Для одержання феротитану можна застосовувати нестандартні титанові відходи у вигляді шматків, брикетів і сипких подріблених обрізків. Останнім часом все частіше застосовують так звані «старі» титанові відходи. Для виробництва феротитану з певним вмістом додавань всі титанові відходи сортують залежно від сплаву або групи сплавів. Для одержання одного фунта титану (1 фунт = 0,453 кг), що міститься у готовому продукті (феротитані), потрібно близько одного фунта відходів, які створюються під час виробництва злитків титанових сплавів і титанових виробів.

Інші марки феротитану, наприклад, деякі марки виробництва компанії «Globe Titanium» (США), потребують низького вмісту алюмінію. Для одержання такої продукції при застосовують технічно алюмінію. Проте несортовий губчатий титан може мати значний вміст заліза, хлоридів металів і кисню, поступаючи у вигляді дрібниці після дроблення значних фрагментів губчатого титану.

Феротитан одержують також алюмотермічним відновленням ільменіту (зазвичай містить від 30 до 40% титану) із засосуванням алюмінієвих відходів (як відновника) і відходів сталі, вапна та плавикового шпату [11]. У цьому разі ціна на феротитан визначається вартістю ільменіту, відходів алюмінію та сталі, а для одержання одного фунта титану, що міститься у феротитані, потрібно близько дев'яти фунтів сировини

Споживання феротитану. За оцінками фірми «Roskill» [12], світове споживання феротитану зросло з 56 тис. т у 2010 р. до 70 тис. т у 2016 р., що небагато перевищує цей показник за 2015 р. Більше половини всього споживання феротитану доводиться на країни Азії; країн і Європи звбезпечують чверть світового попиту, а Північна Америка – близько 15%.

Титан є хімічно активним елементом за високої температури і має високу хімічну спорідненість до сірки, вуглецю і газам, таким як кисень та азот. Тому під час виробництва сталі феротитан застосовують для розкислення а, іноді, для денітрифікування та десульфурації. Титан зв'язує вуглець у карбід титану та зміншує розмір зерна.

До сталі, що містить титан, відносять високоміцні низьколеговані та не ржавіючі сталі. Типовий вміст титану у високоміцних високолегованих сталях складає 0,13%, а в нержавіючих і жароміцних сталях – ще нижче. До мікролегованій високоміцних сталей вводять ванадій, ніобій і титан для зміцнення шляхом подрібнення зерна та дисперсійного тверднення, як правило, разом з додаванням міді, молібдену, алюмінію, хрому і/або нікелю.

Всього декілька аустенітних нержавіючих сталей містять титан. Титан додають у дані сталі за однією з трьох причин: для зв'язування вуглецю у карбід титану, підвищення межі плинності та в деякій (малій мірі) для корозійної стійкості. Серед феритних нержавіючих сталей існує багато різних композицій з додаванням титану. Головною причиною додавання титану є зв'язування малої кількості азоту, яка негативно впливає на властивості феритних нержавіючих сталей.

Дякі високотемпературні нікелеві сплави, у тому числі суперсплави для реактивних двигунів, містять титан. До суперсплавів титан додають для підвищення міцності (у

тому числі, за рахунок утворення карбідів титану), проте цей метал здійснює негативний вплив на стійкість таких сплавів до окислення.

Ключовими сферами кінцевого застосування титанвмісних сталей є наднизькоуглецеві та вдосконалені високоміцні сталі, що використовують в автомобільній промисловості та приладобудуванні. За оцінками роботи [12], приблизно 80% застосувань феротитану доводиться на використання в автомобілях і приладах у сталях містять 0,13% титану. Проте слід зазначити, що останніми роками сталеливарна промисловість використовує менше феротитану для застосування в автомобільних сталях, оскільки виробники автомобілей орієнтовані на проекти на проекти, що потребують легші, тонші і високоміцні сталі, що дозволить понизити загальну вагу транспортного засобу та зменшити споживання палива. Така тенденція свідчить про те, що учасники ринку задаються питанням о том, що учасники ринку задаються питаннями про досягнення ринком у ближчому майбутньому пікового споживання феротитану.

Характерною для загальної картини світового споживання феротитану можна вважати ситуацію у США, де у углецевих сталях використовують 48,2% споживаного феротитану, у високоміцних низьколегованих та інструментальних сталях – 6,9%, в суперсплавах – 4,5% та в інших сталях (у тому числі нержавіючих і жароміцних) – 40,4%.

Торгівля феротитаном. Міжнародна торгівля феротитаном значительною мірою забезпечена експортом з Великої Британії (здебільше до Південної Кореї, Японії, Німеччини та Індії) а Російської Федерації (до Німеччини, Естонії та Бразилії). Останніми роками Естонія також стала експортером, більшість продукції якої призначена для Німеччини та Франції. Деяку частину цієї продукції вироблено у Російській Федерації.

Світовий експорт феротитану в 2016 р. склав 61,97 тис. т, головними експортерами є Велика Британія, Російська Федерація, Естонія та Нідерланди. Стільки ж у 2016 р. склав світовий імпорт (головні імпортери – Нідерланди та Німеччина, а також Південна Корея, Франція, Японія та Бразилія). КНР, Російська Федерація, Велика Британія та США задовольняють більшість внутрішніх потреб своїм виробництвом.

Слід зазначити, що транзитна торгівля феротитаном через Нідерланди призводить до подвійного обліку, оскільки більшість продукції більшість продукції, що імпортується до цієї країни, реекспортирують, головним чином, до Бельгії та Німеччини. За опублікованими даними, за останні декілька років загальний обсяг торгівлі феротитаном і титаном з додаваннями феросиліцію складав приблизно 60 тис. т/рік. Оскільки до цієї кількості входить реекспорт з Нідерландів (та інших країн, таких як Естонія) загальний обсяг феротитану, що поступає у міжнародну торгівлю, було, як минимум, на 10 тис. т/рік меншим.

До Нідерландів імпорт поступає з різних країн виробників і, як сказано вище, в основному, реекспортується. Німеччина, як найбільший імпортер, одержує феротитан, головним чином, з Естонії (деякий обсяг якого складає переважана російська продукція), Російської Федерації, Великої Британії та України.

Ціни на феротитан. В 2005 р. ціни за 1 кг феротитану зросли до безпрецедентного рівня, досягнувши 33 долл. США, внаслідок гострого дефіциту відходів (і, отже, зростання цін на них), а також зростання цін на титан у поєднанні з постійно зростаючим попитом з боку сталелітейних підприємств. Проте на початок 2007 р. збільшено пропозицію і падіння цін на відходи призвели к тому, що котирування «*Metal Bulletin*» впало приблизно до 14 долл. США за 1 кг. Впродовж року ціни на феротитан неухильно знижувалися, оскільки зростання кількості відходів, що утворилися, супроводжувалося їх надлишковою пропозицією. У 2008 р. ціни оставалися стабільними, чому сприяв стійкий попит з боку виробників легованої сталі, проте з настанням глобальної фінансової кризи у 2009 р. ціни на феротитан впали, досягнувши у квітні 2009 р. відмітки 2,80 долл. США/кг.

У міру зменшення постачань відходів ціни на феротитан почали підвищуватися і у першому півріччі через відновлення інтересу з боку споживачів, спостерігалось підвищення цін вище ніж 7 долл. США/кг. У другому півріччі 2010 р. і в першому півріччі 2011 р. ціни продовжували змінюватися, досягнувши у червні 2011 р. 9,50 долл. США/кг, оскільки виробники феротитану зазнавали значних складнощів під час закупівлі відходів. Потім ціни на феротитан поступово знижувалися і, за винятком короткого періоду зростання на початку 2012 р., тенденція зниження цін тривала.

У 2013 р. максимальний рівень ціни в Європі на високопроцентний (70%-ий) феротитан у середньому складав 6,40 долл. США/кг, в 2014 р. – 6,10 долл. США/кг, в 2015 р. – 5,10 долл. США/кг і в 2016 р. – 3,60 долл. США/кг.

Прогноз на 2026 рік. Із збільшенням кількості відходів, які утворюються, що, пов'язано з вищим попитом на титанові вироби, в основному в аерокосмічній промисловості, очікується, що ринок феротитану буде як і раніше забезпечений дешевою сировиною. За прогнозами фірми «Roskill» [12], до 2020 р. щорічне споживання феротитану буде утримуватися у діапазоні 70...80 тис. т/рік. До 2026 р. споживання феротитану буде залишатися на рівні 80...85 тис. т/рік, в 2026 р. очікується 87 тис. т/рік.

Одним з чинників попиту на феротитан є виробництво зварних труб, ~15% яких виготовляють із застосуванням титану. Стійке зростання видобутку природного газу призведе до збільшення попиту на трубопроводи, для яких будуть потрібними значні обсяги високоміцної низьковуглецевої титанвмісної сталі. Не дивлячись на те, що в секторі автомобілебудування застосовують незначну кількість феротитану, вірогідним представляється високий рівень його споживання через безперервно зростаюче світове виробництво автомобілей із достроковою тенденцією його підвищення.

Завдяки поліпшенню перспектив у виробництві нержавіючих і спеціальних сталей (після спаду в 2015 р. і 2016 р.) можливою є стабілізація цін на феротитан. За очікуванням фірми «Roskill», протягом більшої частини прогнозованого періоду номінальна ціна на феротитан у середньому складе 5...6 долл. США/кг, а до кінця періоду (2026 рг.) ціна досягне рівня 6,47 долл. США/кг.

Із збільшенням постачань відходів, що одержують під час виробництва титану вищих переділів (в основному в аерокосмічній промисловості), очікується, що ринок феротитану буде як і раніше забезпеченим сировиною за низькою ціною. У перспективі ціноутворення можуть чекати такі чинники, як сплески попиту або низькі темпи зростання. В цьому разі ціна на феротитан може знаходитися на рівні близько 3,0 долл. США/кг або наближатися до нього. Очікується, що в осяжному майбутньому реальна ціна на феротитан залишатиметься на низькому рівні.

Бібліографічний перелік

1. Колобов Г. А., Печерица К. А., Осипенко А. В., Бубинец А. В. Мировая титановая промышленность и прогноз до 2026 года. Сообщение 1. Титан губчатый. *Металургія : наукові праці ЗДІА*, 2018. Вип. № 1 (39). С. 5-9.
2. Колобов Г. А., Печерица К. А., Осипенко А. В., Бубинец А. В. Мировая титановая промышленность и прогноз до 2026 года. Сообщение 2. Литые титановые заготовки. *Металургія : наукові праці ЗДІА*, 2018. Вип. № 2 (40). С. 3-6.
3. Колобов Г. А., Печерица К. А., Павлов В. В., Панова В. О. Мировая титановая промышленность и прогноз до 2026 года. Сообщение 3. Титановые изделия. *Металургія : наукові праці ЗДІА*, 2019. Вип. 1 (41). С. 5-8.
4. Колобов Г. А., Распорня Д. В., Осипенко А. В. Панова В. О. Обращение с титановыми отходами. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2019. № 1. С. 85-87.
5. Колобов Г. А., Овчинников А. В., Осипенко А. В., Панова В. О. Титановые порошки: современное состояние технологий и рынка. *Титан*. 2019. № 4. С. 24-29.

6. Гасик М. И., Лякишев М. П., Емлин Б. И. Теория и технология производства ферросплавов : учеб. для вузов. Москва : Metallurgiya, 1988. 784 с.
7. Поволоцкий Д. Я., Рошин В. Е., Мальков Н. В. Электрометаллургия стали и ферросплавов. Москва : Metallurgiya, 1995. 592 с.
8. Гасик М. И. Теория и технология электрометаллургии ферросплавов. Москва: Интернет Инжиниринг, 1999. 764 с.
9. Рожихина И. Д., Нохрина О. И. Теория и технология производства ферросплавов : учеб пособие. Ч. 1. Новокузнецк : Сиб. гос. индустр. ун-т, 2006. 258 с.
10. Рожихина И. Д., Нохрина О. И. Теория и технология производства ферросплавов : учеб пособие. Ч. 2. Новокузнецк : Сиб. гос. индустр. ун-т, 2006. 213 с.
11. Патент 2516208 РФ, МПК С22 С 33/04 (2006.01). Титаносодержащая шихта для алюмотермического получения ферротитана, способ алюмотермического получения ферротитана и способ алюмотермического получения титаносодержащего шлака в качестве компонента титаносодержащей шихты для алюмотермического получения ферротитана. Оpubл. 20.05.2014. Бюл. № 14.
12. Titanium Metal: Global Industry, Markets and Outlook to 2026 (Seventh Edition, 2017). – London: Roskill inf. Services LTD, 2017. 560 p.

Reference

1. Kolobov H. A., Pecheritsa K. A., Osipenko A. V., Bubinets A. V. Mirovaya titanovaya promyshlennost' i prognoz do 2026 goda. Soobshchenie 1. Titan gubchtyy. *Metallurgy : naukovi pratsi ZDIA*, 2018. vol. 1 (39). pp. 5-9.
2. Kolobov H. A., Pecheritsa K. A., Osipenko A. V., Bubinets A. V. Mirovaya titanovaya promyshlennost' i prognoz do 2026 goda. Soobshchenie 2. Liteye titanovye zagotovki. *Metallurgy : naukovi pratsi ZDIA*, 2018. vol. 2 (40). pp. 3-6.
3. Kolobov H. A., Pecheritsa K. A., Pavlov V. V., Panova V. O. Mirovaya titanovaya promyshlennost' i prognoz do 2026 goda. Soobshchenie 3. Titanovye izdeliya. *Metallurgy : naukovi pratsi ZDIA*, 2019. vol. 1 (41). pp. 5-8.
4. Kolobov H. A., Raspornya D. V., Osipenko A. V., Panova V. O. Obrashchnenie s titanovymi otkhodami. *Novi materialy i tekhnologii v metallurgii ta mashynobydyvanni*. 2019. no. 1. pp. 85-87.
5. Kolobov H. A., Ovchinnikov A. V., Osipenko A. V., Panova V. O. Titanovye poroshki: covremennoe sostoyanie tekhnologiy i rynka. *Titan*. 2019. no. 4. pp. 24-29.
6. Gasik M. I., Lyakishv M. P., Emlin B. I. Teoriya i tekhnologiya proizvodstva ferrosplavov: uchebnyk dlya vuzov. Moskva : Metallurgiya, 1988. 784 p.
7. Povolotskiy D. Ya., Roshchin V. E., Mal'kov N. V. Elektrometallurgiya stali i ferrosplavov. Moskva : Metallurgiya, 1995. 592 p.
8. Gasik M. I. Teoriya i tekhnologiya elektrometallurgii ferrosplavov. Moskva: Internet Inzhinirin', 1999. 764 p.
9. Rozhikhina I. D., Nokhrina O. I. Teoriya i tekhnologiya proizvodstva ferrosplavov : ucheb. posobie. Ch. 1. Novokuznetsk : Sib. gos. indust. university, 2006. 258 p.
10. Rozhikhina I. D., Nokhrina O. I. Teoriya i tekhnologiya proizvodstva ferrosplavov : ucheb. posobie. Ch. 2. Novokuznetsk : Sib. gos. indust. university, 2006. 213 p.
11. Patent 2516208 RF, МПК С22 С 33/04 (2006.01). Titanosoderzhashchaya shikhta dlya ayumotermicheskogo polucheniya ferrotitana, sposob alyumotermicheskogo polucheniya titanosoderzhashchego shlaka v kachestve komponenta titanosoderzhashchey shikhty dlya alyumotermicheskogo polucheniya ferrotitana. Opubl. 20.05.2014. Byul. no. 14.
12. Titanium Metal: Global Industry, Markets and Outlook to 2026 (Seventh Edition, 2017). London : Roskill inf. Services LTD, 2017. 560 p.

Kolobov Herman, professor-consultant, candidate of technical sciences, Zaporozhe national university.

Panova Vera, of technical department, LTD «The Zaporozhe titanium-magnesium combine».

Nesterenko Tetiana, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporozhe national university.

Kirichenko Aleksej, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporozhe national university.

Rumyantsev Vladislav, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporozhe national university.

Volyar Roman, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporozhe national university

MODERN STATE AND PROGNOSIS OF DEVELOPMENT FOR WORLD TITANIC INDUSTRY ON PERIOD TO 2026

Report 4. Ferrotitanium

The current state of ferrotitanium production capacities is described by producing countries as both the largest such as Great Britain, Russian Federation and China and less powerful ones as Estonia, USA, Ukraine. The largest companies of these countries are indicated (Tivac Alloys, AMG Superalloys UK, Mottram, AMG Superalloys UK, VSMPO-AVISMA, MidUral Group, Globe Titanium, Mast Europe) with their production technologies and ferrotitanium grades. The requirements of consumers for different grades of ferrotitanium are analyzed. Markets and consumption volumes of titanium-containing products obtained using ferrotitanium (titanium-containing ultra-low-carbon, high-strength low- and high-alloyed, stainless steels, superalloys) are indicated. The situation with international trade in ferrotitanium is considered; the main exporters and importers are indicated, as well as the volumes and directions of exports and imports. The share of ferrotitanium re-exports through the Netherlands and Estonia is also taken into account. The dynamics of the price level for ferrotitanium since 2005 has been analyzed, with an indication of the reasons influencing the pricing. A forecast up to 2026 is presented in terms of demand for ferrotitanium by application and price level. According to forecasts, by 2026 ferrotitanium consumption will remain at the level of about 85 thousand tons per year. It is expected that the ferrotitanium market will continue to be provided with cheap raw materials. The price will reach the level of USD 6.47 per kg. In the future, pricing can be expected by factors such as surges in demand or low growth rates. In this case, the price of ferrotitanium may be at or close to \$ 3.0 per kg. Some demand factors are analyzed. The real price of ferrotitanium is expected to remain low for the foreseeable future.

Стаття надійшла: 14.08.2020 р.

.УДК 046.51+669.046.55]-026.65

DOI <https://doi.org/10.26661/2071-3789-2020-1-02>

Харченко Олександр Вікторович, докторант, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет. ORSID: 0000-0003-3717-3872

Лічконенко Наталія Володимирівна, старший викладач, Запорізький національний університет. ORSID: 0000-0003-3717-3872

ТЕПЛОВІ ЕФЕКТИ ВТОРИННОГО ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНОГО ЛЕГУВАННЯ ТА РАФІНУВАННЯ СТАЛІ

Виконано аналіз теплових ефектів матеріалів та електроенергії за позапічної обробки сталей 09Г2С і 35ХГСА із застосуванням технології вторинного електротермічного легування та рафінування (ВЕЛР). Розглянуто особливості змінювання теплових ефектів матеріалів залежно від питомого заряду шлаку та частки внесених матеріалів. Отримано формули для розрахунку теплових ефектів матеріалів під час позапічної обробки рідкої сталі. Розраховано теплові ефекти матеріалів, включаючи феросплави, карбід кремнію, вапно і електроенергію. Зроблено узагальнюючі висновки відносно чинників, що впливають на теплові ефекти за введенням матеріалів до рідкої сталі.

Ключові слова: сталь, метал, шлак, температура, тепловий ефект, феросплав, розкислювання, легування

Вступ. Процес вторинного електротермічного легування та рафінування сталі (ВЕЛР) є відносно новою розробкою [1-5], заснованою на використанні методу хімічних потенціалів Гіббса та вирішенні компактної системи рівнянь матеріального і теплового балансів, а також рівняння електронейтральності шлаку з ненульовим зарядом [7-14]. ВЕЛР з позитивним зарядом шлаку супроводжується зменшенням маси шлаку, поглинанням теплоти та зниженням температури розплаву [5]. Чим більшим є питомий заряд шлаку, тим більше знижуються його маса і температура. Тому особливого значення для технології процесу ВЕЛР набуває контроль і підтримка температури розплаву за рахунок врахування теплових ефектів матеріалів та електроенергії. У роботі [6] наведено результати експериментального визначення теплових ефектів деяких феросплавів під час їх введення до рідкої сталі. Проте ці дані мають обмежене застосування, оскільки були отримані за деяких усереднених умов, де не визначено такі важливі показники, як температура, хімічний склад, окисленість і співвідношення мас металу та шлаку.

Залежно від поточного стану системи «метал-шлак-газ» теплові ефекти можуть бути як позитивними, так і негативними, тобто введення до розплаву легуючих матеріалів може призводити як до підвищення, так і до зниження температури розплаву. Теплові ефекти матеріалів, зокрема феросплавів, зумовлені складною взаємодією елементів, що входять до їх складу, з рідкою сталлю та шлаком. Існують три основні складові такої взаємодії:

1. Поглинання фізичної теплоти розплаву матеріалом з температурою доквілля. Ступінь зниження температури розплаву залежить від температури та теплоємності матеріалу і самого розплаву.

2. Неідеальність багатоконпонентного металевого розчину. Залежно від відхилення від закону Рауля можливим є як поглинання, так і виділення теплоти. Зокрема, розплави заліза з алюмінієм і кремнієм мають значне негативне відхилення від закону Рауля. Додавання матеріалів, до складу яких входять такі елементи, дозволяє одержати значний позитивний тепловий ефект незалежно від міри окисленості системи [15-16].

3. Взаємодія елементів з киснем, що розчинено в рідкому металі, з утворенням оксидної фази (розкислювання). Ця складова істотно залежить від міри окисленості системи

«метал-шлак-газ». Зокрема, для окислених систем кремній- і алюмовмісні матеріали демонструють значний екзотермічний ефект [17].

Кожна з перерахованих складових залежить від теплоємності металу, шлаку та газу, що становлять систему. Окрім того, сама технологія ВЕЛР є додатковим чинником, що впливає як на процес розкислювання, так і на процес окислення металу залежно від полярності заряду шлаку. При цьому відбувається або поглинання теплоти за позитивним зарядом або її виділення за негативним зарядом шлаку [5].

Постановка завдання. У роботі поставлено завдання дослідження теплових (термічних) ефектів, що виникають під час вторинного електротермічного легування та рафінування низьколегованих сталей марок 09Г2С і 35ХГСА за різного рівня питомого заряду шлаку, у тому числі теплові ефекти матеріалів і електроенергії. Ці сталі істотно відрізняються одна від одної вмістом вуглецю, отже, рівень окисленості металу під час їх виплавки та позапічної обробки за інших рівних умов також буде різним.

Основна частина дослідження. У загальному випадку тепловий ефект визначається частинною похідною температури системи «метал-шлак-газ» T за масою матеріалу M , що витрачається, за витраченою електроенергією або за зарядом шлаку. Для матеріалу тепловий ефект має розмірність [К/кг] чи [К/т] і визначається виразом

$$W = \frac{\partial T}{\partial M}. \quad (1)$$

Часто витрату матеріалів визначають відносно маси рідкого металу M_m . В цьому разі тепловий ефект має розмірність [К/(кг/т)] і визначається частинною похідною за питомою масою матеріалу:

$$W = \frac{\partial T}{\partial(M/M_m)}. \quad (2)$$

Визначення теплового ефекту j -го матеріалу за рівняннями (1) або (2) є нетривіальним завданням. Для цього потрібно неявно продиференціювати систему рівнянь матеріального та теплового балансів $\mathbf{F} = \mathbf{0}$ за масою даного матеріалу M_j [11-12]:

$$\partial_i = \begin{bmatrix} \partial \mu_e / \partial M_j \\ \partial Y / \partial M_j \\ \partial Z / \partial M_j \\ \partial T / \partial M_j \end{bmatrix} = -\mathbf{J}^{-1} \begin{bmatrix} \partial F_1 / \partial M_j \\ \partial F_2 / \partial M_j \\ \partial F_3 / \partial M_j \\ \partial F_4 / \partial M_j \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де μ_e , Y , Z , T – шукані змінні системи рівнянь, у тому числі μ_e – рівень Фермі електронів в шлаку (окислювально-відновний потенціал), Y – логарифм зворотної молярної кратності шлаку; Z – логарифм зворотної молярної кратності газу, T – температура системи «метал-шлак-газ»; F_1, F_2, F_3, F_4 – ліві частини системи рівнянь; \mathbf{J} – матриця Якобі системи рівнянь, яка визначається диференціюванням кожного рівняння за кожною шуканою змінною.

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^k n_{(i)} v_i^2 \left(1 - \frac{n_{(i)}}{n_i}\right) & \sum_{i=1}^k n_{(i)} v_i \left(1 - \frac{n_{(i)}}{n_i}\right) & - \sum_{i=1}^k \frac{n_{(i)} n_{\{i\}} v_i}{n_i} & \frac{1}{RT^2} \sum_{i=1}^k n_{(i)} v_i (h_i^M - h_{(i)}^M) \\ \sum_{i=1}^k n_{(i)} v_i \left(1 - \frac{n_{(i)}}{n_i}\right) & \frac{N_s^2}{N} - \sum_{i=1}^k \frac{n_{(i)}^2}{n_i} & \frac{N_s N_g}{N} - \sum_{i=1}^k \frac{n_{(i)} n_{\{i\}}}{n_i} & \frac{1}{RT^2} \sum_{i=1}^k n_{(i)} (h_i^M - h_{(i)}^M) \\ - \sum_{i=1}^k \frac{n_{(i)} n_{\{i\}} v_i}{n_i} & \frac{N_s N_g}{N} - \sum_{i=1}^k \frac{n_{(i)} n_{\{i\}}}{n_i} & \frac{N_g^2}{N} - \sum_{i=1}^k \frac{n_{\{i\}}^2}{n_i} & \frac{1}{RT^2} \sum_{i=1}^k n_{\{i\}} (h_i^M - h_{\{i\}}^M) \\ \sum_{i=1}^k n_{(i)} v_i (h_i^M - h_{(i)}^M) & \sum_{i=1}^k n_{(i)} (h_i^M - h_{(i)}^M) & \sum_{i=1}^k n_{\{i\}} (h_i^M - h_{\{i\}}^M) & C_p \end{bmatrix}, \quad (4)$$

де k – кількість контрольованих хімічних елементів; $n_{[i]}, n_{(i)}, n_{\{i\}}, n_i$ – числа молей i -го елемента відповідно у металі, шлаку, газі та системі; N_s, N_g, N – загальне число молей відповідно у шлаку, газі та системі; C_p – повна теплоємність системи «метал-шлак-газ»; $h_{[i]}^M, h_{(i)}^M, h_{\{i\}}^M, h_i^M$ – парціальні мольні ентальпії змішування відповідно у металі, шлаку, газі та системі; v_i – валентність i -го елемента в шлаку.

Аналітичний вираз для парціальних ентальпій, що входять до формули (4), існує тільки для металу та шлаку [8,9,13]. Тому доцільно визначити їх чисельним диференціюванням парціальної енергії Гіббса кожної із фаз, включаючи газову, за температурою, використовуючи рівняння Гіббса-Гельмгольца. Парціальна мольна ентальпія змішування в системі визначається виразом:

$$h_i^M = \frac{\partial H^M}{\partial n_i} = \sum_{l=1}^k \left(h_{[l]}^M \frac{\partial n_{[l]}}{\partial n_i} + h_{(l)}^M \frac{\partial n_{(l)}}{\partial n_i} + h_{\{l\}}^M \frac{\partial n_{\{l\}}}{\partial n_i} \right), \quad (5)$$

у якому похідні числа молей у фазах за загальним числом молей i -го елемента визначено як *диференціальні коефіцієнти засвоєння* елементів відповідно у металі, шлаку та газі [7].

Вектор похідних за масами матеріалів у правій частині (3) визначається виразом, отриманим диференціюванням складної функції за числом молей кожного хімічного елемента в системі:

$$\begin{bmatrix} \partial F_1 / \partial M_j \\ \partial F_2 / \partial M_j \\ \partial F_3 / \partial M_j \\ \partial F_4 / \partial M_j \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^k \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial n_i} \frac{\partial n_i}{\partial M_j} = \sum_{i=1}^k \begin{bmatrix} Q_s + \frac{n_{(i)} v_i}{n_i} \\ \frac{n_{(i)}}{N_s} - \frac{N}{N} \\ \frac{n_{\{i\}}}{n_i} - \frac{N}{N_g} \\ \frac{n_i}{n_i} - \frac{N}{N} \\ h_i^M - H_j^M \end{bmatrix} \frac{B_{ij}}{A_i}, \quad (6)$$

де Q_s – надлишковий заряд шлаку, зумовлений технологією ВЕЛР; B_{ij} – масова доля i -го хімічного елемента в j -му матеріалі; H_j^M – мольна ентальпія j -го матеріалу; A_i – атомна маса i -го хімічного елемента.

Слід зазначити, що отримані формули дозволяють визначити не лише теплові ефекти матеріалів, але і вплив кожного матеріалу на фазовий і хімічний склад системи «метал-шлак-газ» в результаті перерозподілу в ній хімічних елементів.

Найтипovіший випадок змінування температури розплаву із збільшенням частки внесених матеріалів подано на рис. 1,а. Екстремальний вигляд кривих є характерним за будь-яким рівнем заряду шлаку. Максимальна температура спостерігається за внесенням менше 20% матеріалів, вказаних у табл. 1. Максимум пояснюється екзотермічним ефектом під час розкислювання напівпродукту, що спочатку містить 0,05...0,12% кисню. За подальшим збільшенням маси внесених матеріалів екзотермічний ефект знижується із-за синхронного зниження вмісту кисню в рідкій сталі.

Таблиця 1 – Оптимальні маси матеріалів, які використовують для легування 150 т сталей 09Г2С і 35ХГСА, т

Сталь	ФМн78	МнС17	ФС65	ФХ800Б	ФСХ33	АВ-87	Карбід Si	Вапно
09Г2С	1,26	1,68	1,06	-	-	0,05	-	-
35ХГСА	1,41	-	-	0,37	3,96	0,10	1,16	1,22

На рис. 1,б наведено графіки змінювання температури розплаву під час обробки низьколегованих сталей за технологією ВЕЛР. В результаті відновних процесів відбувається зменшення маси шлаку, поглинання теплоти та помітне зниження температури розплаву, яке необхідно компенсувати додатковим введенням електроенергії.

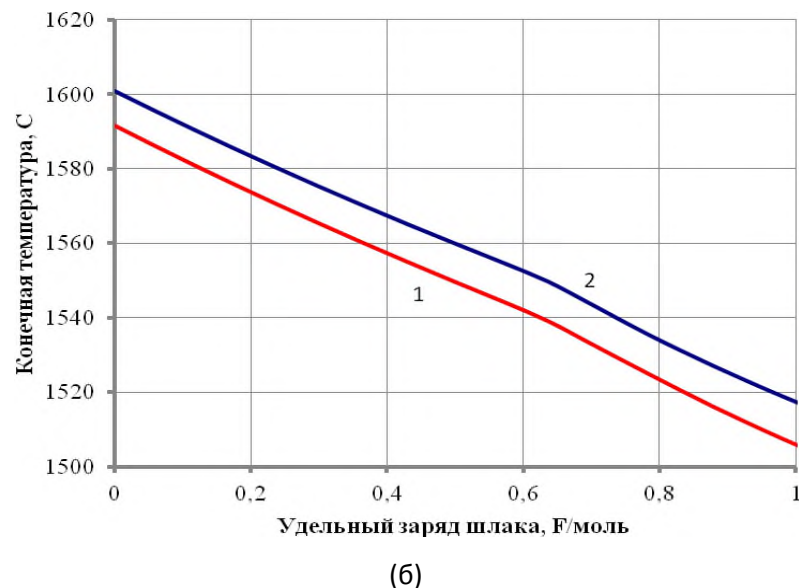
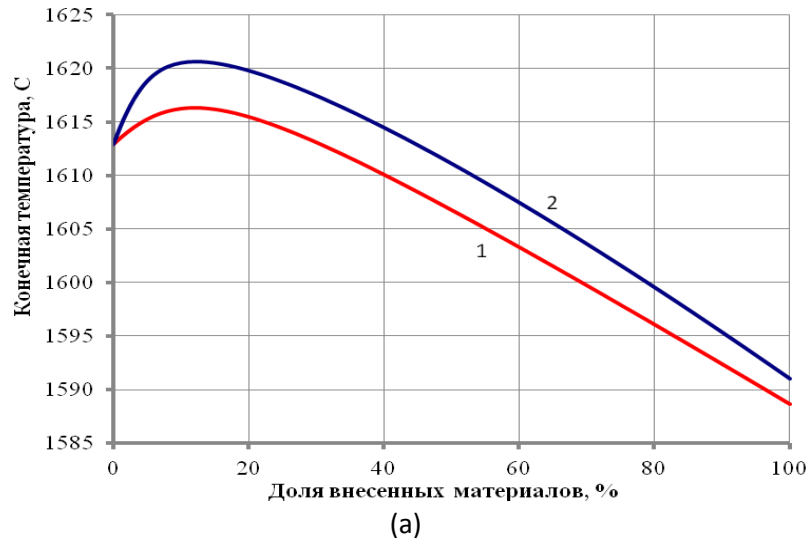
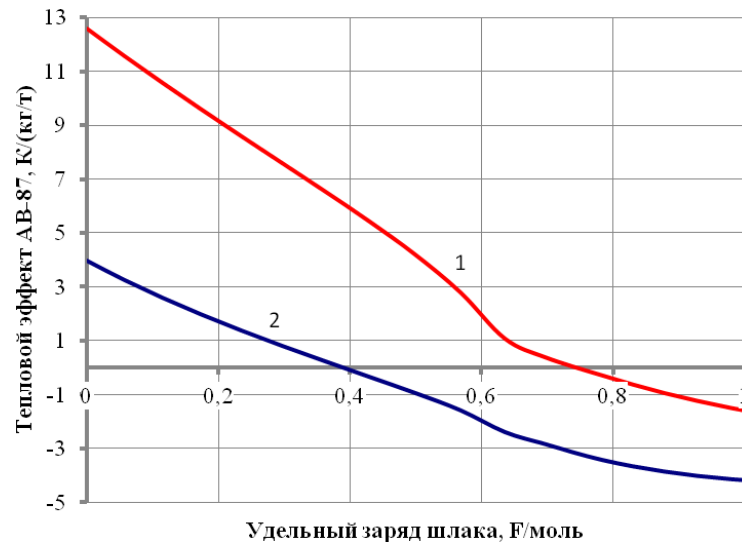
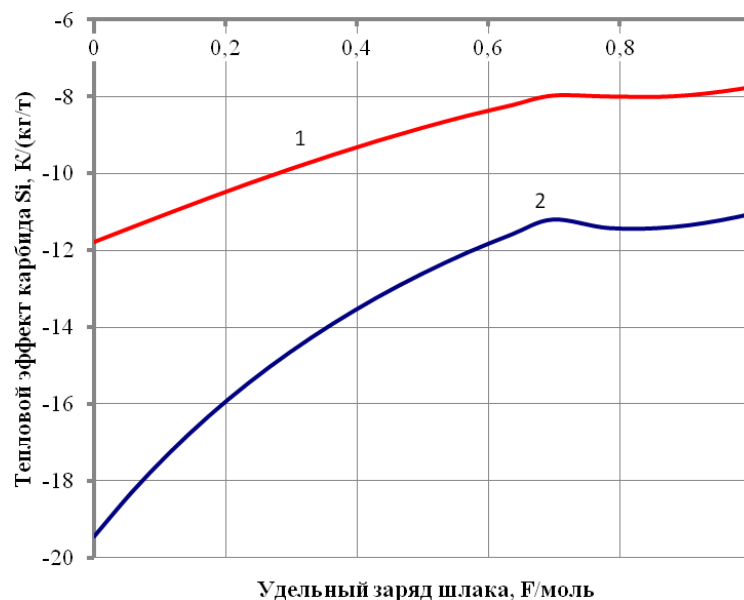


Рисунок 1 – Вплив частки внесених матеріалів (а) і питомого заряду шлаку (б) на температуру розплаву під час обробки сталей марок 09Г2С (1) і 35ХГСА (2) за технологією ВЕЛР

Типовий приклад впливу питомого заряду шлаку на тепловий ефект матеріалу зі значним екзотермічним ефектом – вторинного алюмінію марки АВ-87 – подано на рис. 2,а. Як видно, тепловий ефект цього матеріалу знижується від 12,5 К/(кг/т) для сталі 09Г2С і 3,9 К/(кг/т) для сталі 35ХГСА до області негативних значень під час підвищення питомого заряду шлаку. Це пояснюється відновленням елементів з позитивною валентністю й одночасним зниженням вмісту кисню у сталі під час обробки. В цілому спостерігається більш високий тепловий ефект АВ-87 за обробкою низьковуглецевої сталі 09Г2С, яка спочатку містить більше кисню.



(а)



(б)

Рисунок 2 – Вплив питомого заряду шлаку на теплові ефекти вторинного алюмінію АВ- 87 (а) і карбіду кремнію (б) під час обробки сталей марок 09Г2С (1) і 35ХГСА (2) за технологією ВЕЛР

На рис. 2,б наведено графік змінювання теплового ефекту карбіду кремнію під час збільшення питомого заряду шлаку q від 0 до 1 Ф/моль. Цей матеріал також має екзотермічний ефект за високої окисленості сталі, проте вуглець, що входить до складу карбіду кремнію, значно знижує його. Характер такої залежності пояснюється взаємодією вуглецю з киснем розплаву з утворенням газової фази за $q < 0,6$ Ф/моль. При цьому відбувається поглинання теплоти газовою фазою, що супроводжується низькими показниками теплового ефекту. За видалення кисню з підвищенням питомого заряду шлаку тепловий ефект карбіду кремнію помітно підвищується для обох досліджених сталей.

Висновки. Встановлено, що теплові ефекти матеріалів під час обробки низьколегованих сталей з використанням технології вторинного електротермічного легування та рафінування істотно залежать як від частки внесених матеріалів, так і від питомого заряду шлаку. На основі термодинамічного аналізу системи «метал-шлак-газ» отримано формули

для розрахунку теплових ефектів матеріалів, у тому числі в процесі ВЕЛР. Розраховано теплові ефекти всіх матеріалів, що використовують для розкислювання-легування сталі, включаючи феросплави, карбід кремнію, вапно та електроенергію. Досліджено особливості змінювання теплових ефектів матеріалів залежно від питомого заряду шлаку за позапічної обробки сталей 09Г2С і 35ХГСА. Показано, що збільшення питомого заряду шлаку знижує тепловий ефект вторинного алюмінію та інших матеріалів з великим екзотермічним ефектом. В той же час відбувається відносно підвищення теплового ефекту вуглецьовмісних матеріалів, таких як карбід кремнію. На прикладі сталей 09Г2С і 35ХГСА показано екстремальну залежність температури розплаву від частки внесених матеріалів.

Бібліографічний перелік

1. Харченко, А. В., Личконенко Н. В., Мосейко Ю. В. Вторичное легирование и рафинирование стали в установках печь-ковш. *Металургія : збірник наукових праць ЗДІА*, 2012. Вип. 1(26). С. 17-21.
2. Харченко, А. В., Лаптев Д. А., Башлий С. В. Экспериментальные исследования технологии вторичного электротермического легирования и рафинирования. *Металургія : збірник наукових праць ЗДІА*, 2014. Вип. 1(31). С. 30-35.
3. Харченко, А. В., Кириченко А. Г., Белоконь Ю. А. Термодинамика и кинетика процесса вторичного электротермического легирования и рафинирования металла. *Металургія : збірник наукових праць ЗДІА*, 2015. Вип. 1(33). С. 9-13.
4. Харченко, А. В., Личконенко Н. В. Вторичное электротермическое легирование и рафинирование металла с участием газовой фазы. *Металургія : збірник наукових праць ЗДІА*, 2016. Вип. 1(35), 2016. С. 9-13.
5. Харченко, А. В., Синяков Р. В., Личконенко Н. В. Вторичное электротермическое легирование и рафинирование низколегированной стали. *Метал та лиття України*. 2019. Т. 27. № 10-12. С. 56-63.
6. King, R. J., Chilcott W. R. Chilling Effects of Ferroalloy Additions to Liquid Steel. *Physical Chemistry of Production of Use of Alloy Additives*. АІМЕ : New York. 1974.
7. Харченко, А. В., Пономаренко А. Г., Довгонюк С. В. Дифференциальные коэффициенты усвоения в компьютерных системах управления плавкой и внепечной обработкой стали. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2002. № 10. С. 131-137.
8. Харченко, А. В., Пономаренко А. Г., Корзун Е. Л. Термодинамическая модель многокомпонентной конденсированной фазы. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2004. № 8 (228). С. 135-139.
9. Харченко, А. В. Теплоёмкость и другие термодинамические функции смешения многокомпонентной конденсированной фазы. *Металургія : збірник наукових праць ЗДІА*. 2012. Вип. 2 (27). С. 20-28.
10. Харченко, А. В., Пономаренко А. Г. Термодинамическое моделирование системы металл-шлак-газ с учетом тепла химических реакций. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2004. № 8. С. 40-43.
11. Харченко, А. В. Термодинамическое моделирование системы «металл-шлак-газ» с учетом энтальпийного теплового баланса. *Метал та лиття України*. 2005. Т. 13. № 6. С. 13-17.
12. Харченко, А. В., Будакова С. А. Интегрированный расчет материального, энергетического и теплового балансов плавки в системах управления сталеплавильными процессами. Труды Девятого конгресса сталеплавильщиков. Старый Оскол, 17-19.10.2006 г. Москва : Черметинформация, 2007. С. 178-187.
13. Харченко А. В., Синяков Р. В. Термодинамическая модель многокомпонентной жидкой шлаковой фазы. *Металургія : збірник наукових праць ЗДІА*, 2016. Вип. 2(36). С. 16-22.
14. Харченко А. В., Синяков Р. В., Личконенко Н. В. Применение метода химических потенциалов Гиббса в черной металлургии. *Металургія : збірник наукових праць ЗДІА*, 2017. Вип. 2(38). С. 20-25.
15. Люпис К. Химическая термодинамика материалов. Пер. с англ. Москва : Металлургия. 1989. 503 с.

-
16. Эллиот Д. Ф., Глейзер М. В. Термохимия сталеплавильных процессов. Москва : Metallurgiya, 1969. 252 с.
 17. Куликов И. С. Раскисление металлов. Москва : Metallurgiya, 1975. 504 с.

References

1. Khrchenko A. V., Lichkonenko N. V., Mosejko YU. V. Vtorichnor legirovanie I rafinirovanie stali v ustanovkakh «pech'-kovsh». *Metallurgiya : Zbirnyk naukovykh prats' ZDIA*, 2012. vol. 1(26). pp. 17-21.
2. Khrchenko A. V., Laptev D. A., Bashliy S. V. Eksperimental'nye issledovaniya tekhnologii vtorichnogo elektrotermicheskogo legirovaniya i rafinirivaniya. *Metallurgiya : Zbirnyk naukovykh prats' ZDIA*, 2014. vol. 1(31). pp. 30-35.
3. Khrchenko A. V., Kirichenko A. G., Belokon' Yu, A. Termodinamika I kinetika protsessa vtorichnogo elektrotermicheskogo legirovaniya I rafinirovaniya metalla. *Metallurgiya : Zbirnyk naukovykh prats' ZDIA*, 2015. vol. 1(33). pp. 9-13.
4. Khrchenko A. V., Lichkonenko N. V. Vtorichnoe elektrotermicheskoe legirovanie I rafinirovanie metalla s uchastiem gazovoy fazy. *Metallurgiya : Zbirnyk naukovykh prats' ZDIA*, vol. 1(35), 2016. pp. 9-13.
5. Khrchenko A. V., Sinyakov R. V., Lichkonenko N. V. Vtorichnoe elektrotermicheskoe legirovanie I rafinirovanie nizkolegirovannoy stali. *Metal ta lyttya Ukrainy*. 2019. t. 27. no. 10-12. pp. 56-63.
6. King, R. J., Chilcott W. R. Chilling Effects of Ferroalloy Additions to Liquid Steel. *Physical Chemistry of Production of Use of Alloy Additives*. AIME : New York. 1974.
7. Khrchenko A. V., Ponomarenko A. G., Dovgonyuk S. V. Differentsial'nye kooffitsienty usvoeniya v komp'yuternykh sistemakh upravleniya plavkoy i vnepechnoy obrabotkoy stali. *Metallurgicheskya I gornorudnaya promyshlennost'*. 2002. no. 10. pp. 131-137.
8. Khrchenko A. V., Ponomarenko A. G., Korzun E. L. Termodinamicheskaya model' mnogokomponentnoy kondensirovannoy fazy. *Metallurgicheskya I gornorudnaya promyshlennost'*. 2004. no. 8 (228). pp. 135-139.
9. Khrchenko A. V. Teploemkost' I drugie termodinamicheskie funktsii smesheniya mnogokomponentnoy kondensirovannoy fazy. *Metallurgiya : Zbirnyk naukovykh prats' ZDIA*, 2012. vol. 2 (27). pp. 20-28.
10. Khrchenko A. V., Ponomarenko A. G. Termodinamicheskoe modelirovanie systemy metall-shlak-gaz s uchetom tepla khimicheskikh reaktsiy. *Metallurgicheskya I gornorudnaya promyshlennost'*. 2004. no. 8. pp. 40-43.
11. Khrchenko A. V. Termodinamicheskoe modelirovanie systemy metall-shlak-gaz s uchetom ental'piynogo tplovogo balansu. *Metal ta lyttya Ukrainy*. 2005. t. 13. no. 6. pp. 13-17.
12. Khrchenko A. V., Budakva S. A. Integrirovannyi raschet material'nogo I teplovogo balansov plavki v sistemakh upravleniya staleplavil'nymi protsessami. *Trudy Devyatogo kongressa staleplavil'shchikov*. Staryy Oskol, 17-19.10.2006 g. Moskva : Chermetinformatsiya, 2007. pp. 178-187.
13. Khrchenko A. V., Sinyakov R. V. Termodinamicheskaya model' mnogokomponentnoy zhidkoy shlakovoy fazy. *Metallurgiya : Zbirnyk naukovykh prats' ZDIA*, 2016. vol. 2(36). pp. 16-22.
14. Khrchenko A. V., Sinyakov R. V., Lichkonenko N. V. Primenenie metoda khimicheskikh potentsialov Gibbsa v cheroi metallurgii. *Metallurgiya : Zbirnyk naukovykh prats' ZDIA*, 2017. vol. 2(38). pp. 20-25.
15. Lyupis K. Khimicheskaya termodinamika. Per. s angl. Moskva : Metallurgiya. 1989. 503 p.
16. Elliot D. F., Glejzer M. V. Termokhimiya staleplavil'nykh protsessov. Moskva : Metallurgiya, 1969. 252 p.
17. Kulikov I. S. Raskislenie metallov. Moskva : Metallurgiya, 1975. 504 p.

Khrchenko Alexander, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporizhzhia National University.

Lichkonenko Natalia, senior lecturer, Zaporizhzhia National University.

THERMAL EFFECTS OF SECONDARY ELECTROTHERMAL ALLOYING AND REFINING OF STEEL

Analysis of the thermal effects of materials and electricity in the out-of-furnace treatment of 09G2S and 35HGSA steels using technology of secondary electrothermal alloying and refining (SEAR) has been carried out. The features of the change in the thermal effects of materials are considered depending on the specific charge of the slag and the portion of added materials. It is shown that, depending on the current state of the "metal-slag-gas" system, the thermal effects of materials can be either positive and negative, which is due to the complex interaction of the elements that make up their composition with liquid steel and slag. Main components of such interaction are listed: absorption of the physical heat of the melt by the material with the ambient temperature; imperfection of a multicomponent metal solution; interaction of elements with oxygen dissolved in liquid metal. It was found that the thermal effects of materials during the processing of low-alloy steels using the SEAR technology significantly depend on both the proportion of the introduced materials and the specific charge of the slag. On the basis of thermodynamic analysis of the "metal-slag-gas" system, formulas for calculating heat effects were obtained. Thermal effects of all materials used for deoxidationalloying, including ferroalloys, silicon carbide, lime, and electricity, have been calculated. It is shown that an increase in the specific charge of the slag reduces the thermal effect of secondary aluminum and other materials with a large exothermic effect. At the same time, there is a relative increase in the heat effect of carbonaceous materials such as silicon carbide. Using steels 09G2S and 35HGSA as an example, an extreme dependence of the melt temperature on the portion of added materials is shown. Generalizing conclusions have been made regarding factors affecting the thermal effects when adding materials into liquid steel.

Стаття надійшла: 05.11.2020 р.

УДК 621.767:532.52

DOI <https://doi.org/10.26661/2071-3789-2020-1-03>

Терновий Юрій Федорович, професор, доктор технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-1078-4430

Баглюк Геннадій Анатолійович, старший науковий співробітник, доктор технічних наук, Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАНУ

Панова Віра Олегівна, асистент, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0001-8871-251X

ОДЕРЖАННЯ ПОРОШКІВ ПІДВИЩЕНОЇ ПЛИННОСТІ РОЗПИЛЕННЯМ МЕТАЛЕВИХ РОЗПЛАВІВ ВОДОЮ ВИСОКОГО ТИСКУ ЗА УМОВ ПОДВІЙНОГО ПОВІТРЯНО-ВОДЯНОГО СМЕРЧУ

Повідомлення 2. Модель розпилення

На основі моделі водяного розпилення високотемпературних розплавів, а також з урахуванням експериментальних і літературних даних розроблено модель розпилення розплавів водою в «смерчі». Стабільний режим розпилення з утворенням сфероїдальних частинок забезпечується мінімальним відстанню між струменем розплаву і потоком води, що обертається, за якої в пограничному шарі газового потоку досягається швидкість близько 90...100% від швидкості води. Розглянуто причини перетворення форми частинок, що утворюються, під час переходу від розпилення кільцевою форсункою до розпилення в «смерчі». Головною причиною є відсутність прямого контакту струменя розплаву та рідких крапель металу з водою. З урахуванням запропонованої моделі та технічних параметрів розпилення було отримано формулу для визначення медіанного діаметра частинок порошку.

Ключеві слова: водяне розпилення, розплав, «смерч», модель, частинка, формоутворення, сфероїдизація

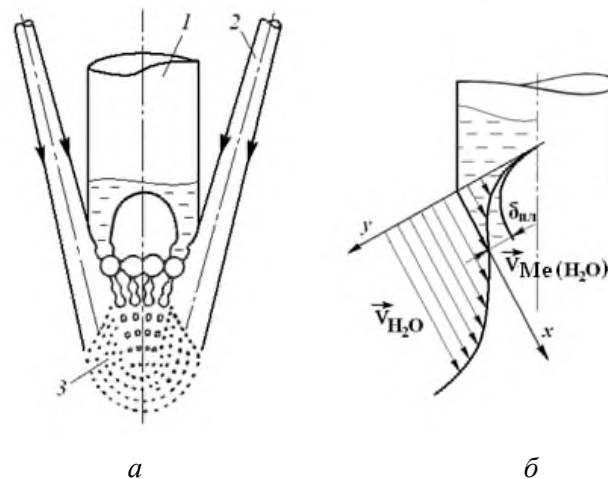
Вступ. Процес розпилення струменя рідкого металу водою з використанням кільцевої форсунки за стандартною схемою широко досліджено експериментально та теоретично [1-3]. За цією технологією у великому діапазоні умов частинки порошку набувають неправильної форми, яка обмежує сферу їхнього застосування, зокрема через низьку плинність. Як результат варіювання параметрів розпилення, а саме кута атаки водяного потоку та його закручування, у роботах [4,5] експериментально було знайдено спосіб отримання порошків, якість яких принципово відрізняється від характерного для водяного розпилення. Частинки залежно від умов розпилення набувають форми від сфероїдальної до сферичної. Цей спосіб було покладено до основи технологій, відомих в літературі як, відповідно, «розпилення розплавів водою високого тиску в смерчі» та «ultra high pressure swirl water atomization».

У роботі [6] нами показано, що розпилення розплавів водою високого тиску в «смерчі» є перспективною схемою отримання порошків металів підвищеної насипної щільності та плинності. Одночасно має інтерес механізм формування зазначеним способом частинок сфероїдальної форми різних розмірів. Проте теоретичне обґрунтування механізмів формування частинок сферичної форми під час розпилення металів водою в літературі подано фрагментарно та неповно.

Постановка завдання. На підставі отриманих раніше експериментальних даних розробити модель розпилення розплавів водою високого тиску в «смерчі», порівняти з моделлю розпилення кільцевою форсункою без обертання водяного потоку та визначити умови, що призводять до утворення часточок сфероїдальної форми.

Головна частина досліджень. Відомою є фізико-математична модель розпилення водою струменя металевого розплаву [2], яку апробовано під час отримання порошків ви-

соколегованих інструментальних сталей, феросплавів, комплексних лігатур, алюмінію та його сплавів на дослідному заводі ДП «УкрНДІспецсталь» (м. Запоріжжя). Модель включає (рис. 1): перетворення початкового струменя металу під час контакту з потоком води на конічну плівку, що сходиться до осі струменя; розвиток на поверхні плівки поздовжніх і поперечних хвиль; нестійкість і розпад торця плівки на краплі. Краплі металу інтенсивно охолоджуються в зоні розпилення у водно-паровому середовищі та кристалізуються, не досягнувши геометричної рівноваги, у вигляді часточок коралоподібної форми.



1 - струмінь металу; 2 - кільцевий потік води; 3 - зона охолодження крапель металу;
 V_{H_2O} - швидкість потоку води; $V_{Me(H_2O)}$ - швидкість струменя металу, що зумовлена контактом із струменем води; $\delta_{пл}$ - товщина плівки металу

Рисунок 1 – Розпилення струменя рідкого металу:

а - схема розпилення, б - розподіл швидкостей у системі «вода-метал»

Формування плівки рідкого металу ($\delta_{пл}$, рис. 1б) з поперечними та поздовжніми коливаннями підтверджує знімок, що подано на рис. 2.

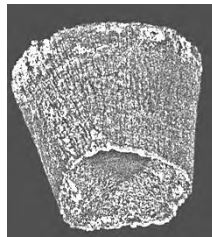


Рисунок 2 – Поперечні та поздовжні хвилі на плівці металу під час водяного розпилення

Утворення коралоподібних частинок зумовлено дією динамічного потоку води, а також закипанням водяних крапель, що утворюються при попаданні води у розплав, що підтверджує структура поверхневого шару застиглого металу у вузлі розпилення (рис. 3), а також порожнисті частинки порошку (рис. 4).

Медіанний розмір частинок у такому разі визначається за формулою [7]:

$$d_m = k \cdot G_{Me}^{1,44} \cdot G_{H_2O}^{-0,5} \cdot v_{Me}^{0,35} \cdot \gamma_{Me}^{0,15} \cdot D_c^{-1,03} \cdot \rho_{Me}^{-0,56} \cdot \rho_{H_2O}^{-0,25} \cdot v_{H_2O}^{-0,07} \cdot V_{H_2O}^{-0,96}, \quad (1)$$

де G_{Me} , G_{H_2O} – витрата металу та води, відповідно, кг/с; v_{Me} , v_{H_2O} – кінематична в'язкість рідкого металу та води, м²/с; γ_{Me} – поверхневий натяг рідкого металу, Дж/м²; D_c – діаметр

струменя металу, м; ρ_{Me} , ρ_{H_2O} – щільність рідкого металу та води, відповідно, кг/м³; V_{H_2O} – швидкість води, м/с.

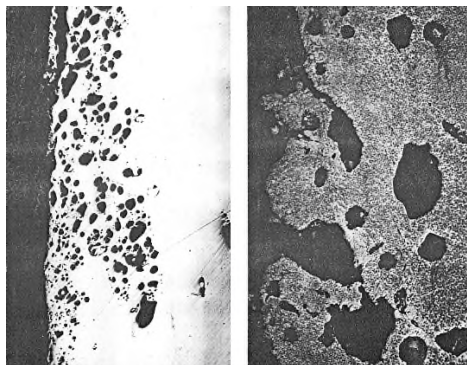


Рисунок 3 – Структура біляповерхневого шару металу, застиглому у вузлі розпилення під час водяного розпилення сталі Р6М5: а - $\times 20$, б - $\times 100$

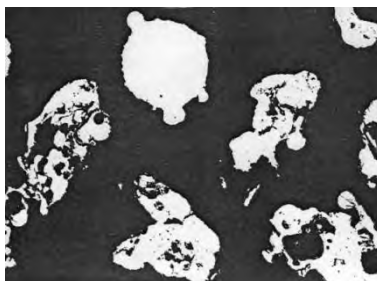


Рисунок 4 – Шліф порошку сталі Р6М5, фр. - 400+315

При цьому витрату металу визначають як $G_{Me} = 0,25\rho_m \cdot \pi \cdot D_c^2 \cdot (2g \cdot h)^{0,5}$, де h – висота шару металу в металоприймачі, м.

Таким чином, чим більша витрата та швидкість води та чим менша в'язкість розплаву, тим вища ймовірність отримання дрібних порошоків за заданої товщини струменя металу. Проте вплинути на форму частинок головної фракції порошку під час розпилення за такою схемою не є можливим.

У зв'язку із спостереженням останнім часом підвищення інтересу до процесів отримання сферичних порошоків, зумовленого, зокрема, розвитком адитивних лазерних технологій, представляє інтерес технологія водяного розпилення з отриманням сферичних порошоків як економічніша у порівнянні з газовим розпиленням.

Особливістю технології розпилення у «смерчі» є розпилення струменя рідкого металу кільцевим потоком води без їхнього зіткнення [6]. Кільцева форсунка вихрового типу формує потік води, що обертається, у вигляді гіперболоїда, в порожнину якого подають струмінь металу. У експериментах з різними сплавами нами було витримано відстань між потоком води та струменем металу близько 10^{-3} м. Одночасно формувалася газовий (пароповітряний) прошарок, що обертався, який призводив до розпилення струменя металу. Створювані частинки порошку мали сфероїдальну форму.

Пізніше автори робіт [4,8] визначили, що в області «перешийка» гіперболоїда та нижче нього різко понижується тиск пароповітряного середовища, внаслідок чого струмінь металу стає нестійким і диспергує. Одночасно, чим більше досягається перепад тиску, тим дрібнішим є отриманий порошок. Використовуючи форсунку зі всмоктуючою трубою, автори отримали дуже дрібні порошки сфероїдальної форми. Автори припустили, що краплі металу, пройшовши звужену частину гіперболоїда, відносно спокійно охолоджуються практично без контакту з водою та тверднуть у вигляді частинок з формою бли-

зкою до сферичної або ж сферичних за рахунок поверхневого натягу. Проте формалізації моделі, яка пояснювала б утворення сферичних частинок, запропоновано не було.

Особливістю способу розпилення у «смерчі» є можливість отримання сфероїдальних порошків як дрібних, так і великих фракцій (рис. 5).

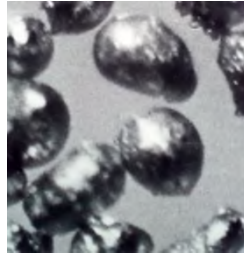
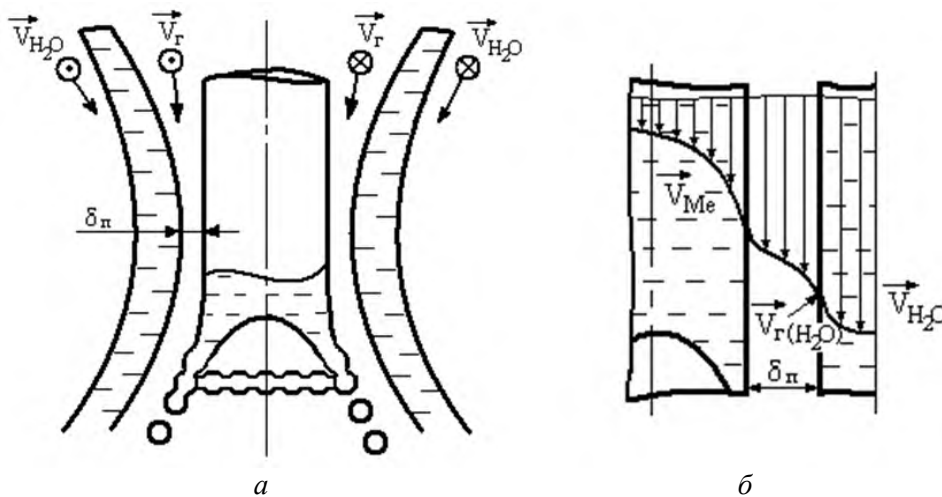


Рисунок 5 – Частинки порошку ФМн1,5 (фракція +63-100 мкм), отриманого за технологією розпиленням у «смерчі» [6]

Експериментальні дослідження технологічних режимів отримання сфероїдальних порошків виконували на дослідній лінії ДП «УкрНДІспецсталь» з виробництва водно-розпиленних порошків. Вузол розпилення включав гідравлічну форсунку високого тиску кільцевого типу з подаванням води уздовж осі й одночасним обертанням навколо струменя металу, що розпилюють.

Було встановлено, що сфероїдальні частинки утворюються за умов, коли потік води, що обертається, не торкався струменя металу та проходив на мінімальній відстані від неї й утворював повітряний пограничний шар, що обертається водним потоком.

Результати досліджень дозволяють припускати наступну модель розпилення струменя металу «в смерчі» (рис. 6).



\vec{V}_{H_2O} - швидкість руху водяного конічного потоку; \vec{V}_r - швидкість ежектованого газу (повітря);
 $\vec{V}_{r(H_2O)}$ - швидкість газу в зоні перешийка (зона δ_n); δ_n - мінімальна відстань між водою і рідким металом

Рисунок 6 – а) схема розпилення подвійним смерчем вода-газ; б) розподіл швидкостей в системі «вода-газ-метал» в області «перешийка» (вертикальний напрям)

Як видно з рис. 8, розпилення відбувається без безпосереднього зіткнення потоку води із струменем металу. Потік води, що обертається, із значною швидкістю витікає з кільцевої щілини й утворює плівку у формі гіперболоїда обертання, до порожнини якого, уздовж його осі, поступає струмінь розплавленого металу. Причиною розпилення металу за таких умов є формування подвійного повітряно-водяного смерчу: водяна воронка, що обертається, призводить до ежекції газу (повітря) та ініціює обертання газового стовпа у її

порожнині. У районі мінімальної відстані між водою та струменем металу δ_n швидкість газового потоку повинна різко зростати, призводячи до зниження нормальної складової тиску газового середовища (розрідженню), та, як результат, до нестабільності й руйнування струменя розплаву.

Швидкість газового стовпа визначається швидкістю потоку води (рис. 8,б) і суттєво знижується під час видалення від поверхні їхнього контакту: $V_{H_2O}(y)/V_{H_2O} = (y/\delta_T)^{1/7}$ (тут y – координата, що перпендикулярна поверхні) [7]. Тому велике значення має товщина газового прошарку δ_n , яка забезпечується поєднанням геометричних параметрів форсунок за заданим діаметром струменя металу. Для забезпечення ефективного розпилення потрібно досягти деякого оптимального (мінімального) значення δ_n , коли швидкість газового потоку, що примикає до поверхні струменя металу, відповідатиме швидкостям, характерним для газового розпилення. Кут атаки потоку води, а також кут його закручування є тими параметрами, що визначають місце розташування та глибину розрідження, що створюється, а отже і величину ежекції і витрату газу.

Модель розпаду струменя металу на краплі у такому разі відрізняється від поданої на рис. 1 і включає наступну послідовність:

- початковий струмінь металу за рахунок потоку газу, що всмоктується та обертається, перетворюється на кінцеву плівку, що розбігається;
- в плівці розвиваються поздовжні та поперечні коливання;
- на периферії плівки з хвиль з максимальною амплітудою формуються мікрострумені;
- мікрострумені за рахунок розвитку в них коливань розпадаються на краплі;
- краплі тверднуть за рахунок охолодження у пароповітряній області, а потім – у воді.

Підтвердженням викладеної вище схеми може бути плівка рідкого металу, що затверділа під час розпилення (рис. 7).



Рисунок 7 – Поперечні та поздовжні хвилі на плівці металу під час розпилення у «смерчі»

Присутність газового прошарку, що динамічно обертається, має вирішальний вплив на результат кристалізації крапель. У нашому випадку, за рахунок вихрового руху та відсутності прямого контакту струменя розплаву з водою частинки менше стикаються одна з одною і зазнають меншого деформуючого впливу на форму. Первинне охолодження частинок здійснюється, головним чином, за рахунок вимушеної конвекції в газі [9], що дає змогу частинкам набути форми, близької до сферичної, до моменту їх повного твердіння.

Таким чином, розпилення у «смерчі», по суті, є розпиленням газом, що рухається зі швидкістю, яку визначає потік води.

Одночасно слід враховувати також температурний градієнт газового прошарку. Ми не мали можливості виміряти температуру в цій зоні. Проте спостережуване формування частинок з комірчастою структурою (рис. 8) свідчить про високі швидкості твердіння (близько 10^6 K/c). Це може бути пояснено лише взаємодією крапель, що твердіють, з во-

дою, що призводить до їх загартування під час кристалізації з урахуванням впливу режиму кипіння води, що показано нами в роботі [9]. Проте сферична форма частинок свідчить, що розпилення у подвійному водно-повітряному смерчі дає перевагу перед звичайним водяним розпиленням, яка полягає у відсутності руйнівної дії води на краплі, що формуються, та у збільшенні часу твердіння крапель (часу пробігу до зустрічі з водою) завдяки наявності газового прошарку. Форма частинок також непрямо або опосередковано свідчить про відсутність деформуючого ефекту під час зіткнення частинок з водою, а отже про формування до цього моменту твердої оболонки достатньої товщини, щоб витримати тангенціальний вхід у воду (ймовірно, за рахунок зіткнення крапель металу з краплями води).



Рисунок 8 – Мікроструктура порошку ФМн1,5, отриманого розпиленням водою «у смерчі», фракція +63-100 мкм, $\times 400$

Запропонована модель розпиленням «газовим прошарком» схожа з моделлю розпиленням газом, описаною в роботі [2]. Відмінність полягає лише в тому, що швидкість газу задається швидкістю води.

Враховуючи технологічні, фізичні та геометричні параметри, частинок порошку, що формуються «у смерчі»:

$$d_m = k \cdot G_{Me}^{0,3} \cdot G_{H_2O}^{-0,3} \cdot v_{Me}^{0,4} \cdot \gamma_{Me}^{-0,03} \cdot D_c^{0,63} \cdot \rho_{Me}^{0,2} \cdot \rho_{\Gamma}^{-0,17} \cdot V_{\Gamma}^{-0,34}, \quad (2)$$

де ρ_{Γ} , V_{Γ} – щільність і швидкість руху газу в шарі, що примикає до потоку води, м/с.

Одночасно у формулі (2) замість швидкості газу в турбулентному пограничному шарі δ_n використовували вираз для середньої швидкості води в пограничному шарі $V_{\Gamma} \approx 0,85V_{H_2O}$. Формулу було перевірено на сталях і сплавах, у тому числі ФМн1,5, Р6М5, лігатурах на основі марганцю, сплавах на основі алюмінію та міді.

Висновки. Причиною утворення сфероїдальних частинок є відсутність прямого контакту крапель металу з водою. Розпилення здійснюють водою, але через тонкий шар газу. Одночасно велике значення має товщина газового прошарку. За оптимальних параметрів розпилення досягається збільшення часу твердіння крапель, що сприяє отриманню частинок сферичної або близькою до сферичної форми.

З урахуванням запропонованої моделі та технічних параметрів розпилення було отримано реальну формулу для визначення медіанного розміру частинок отриманого порошку.

Запропонований спосіб є перспективним для одержання сфероїдальних порошків будь-якого хімічного складу, у тому числі на основі заліза та його сплавів, а також міді та її сплавів і збереженням переваг водяного розпилення.

Бібліографічний перелік

1. Ничипоренко О. С., Найда Ю. И., Медведовский Л. Б. Распыленные металлические порошки. Киев : Наукова думка, 1980. 237 с.
2. Терновой Ю. Ф., Баглюк Г. А., Кудиевский С. С. Теоретические основы процессов распыления металлических расплавов : монография. Запорожье: РИО ЗГИА, 2008. 298 с.

3. Handbook on non-ferrous metal powders: technologies and applications. Ed.: O. Neikov, S. Naboychenko, N. V. Yefimov. Elsevier, 2019. 974 p.
4. Спосіб получения пасивированного порошка среднеуглеродистого ферромарганца: А.с. 1603649 СССР А1, МКИ³ В22 F9/08. Заявл. 27.10.88, опубл. 27.10.89.
5. Method for preparing metal powder. Patent US6336953 B1. Publ. 01.08.2002.
6. Терновий Ю. Ф., Воденніков С. А., Панова В. О. Отримання порошоків збільшеної плинності розпиленням водою високого тиску в умовах подвійного повітряно-водяного смерчу. (Повідомлення 1). *Металургія: наукові праці ЗДІА*. 2018. Вип. 2(40). С. 33-37.
7. Терновой Ю. Ф., Кудиевский С. С., Пашетнева Н. Н. Инженерные расчеты технологических процессов распыления расплавленных металлов : монография. Запорожье : РИО ЗГИА, 2005. 149 с.
8. Development of spherical fine powders by high pressure water atomization using swirl water jet / M. Kikukawa, S. Matsunaga, T. Inaba et al. *Proc. of 2000 Powder Metallurgy World Congress*. Part 1. Nov. 12-16, 2000. Kyoto (Japan). P. 363-366.
9. Терновой Ю. Ф., Панова В. О. Вынужденный теплообмен и скорость охлаждения капель при распылении расплава водой. *Металургія: наукові праці ІІ ЗНУ*. 2019. Вип. 1(1). С. 15-18.

References

1. Nichiporenko O. S., Naida Yu. I., Medvedovskii L. B. Raspylennye metallicheskie poroshki [Atomized metal powders]. Kiev: Naukova dumka, 1980. 237 p.
2. Ternovoi Yu. F., Bagliuk G. A., Kudievskii S. S. Teoreticheskie osnovy protsessov raspylenia metallicheskih rasplavov [Theoretical basis for processes of atomization of metal melts] : monograph. Zaporozh'e : RIO ZGIA, 2008. 298 p.
3. Handbook on non-ferrous metal powders: technologies and applications. Ed. O. Neikov, S. Naboychenko, N. V. Yefimov. Elsevier, 2019. 974 p.
4. Sposob poluchenia passivirovannogo poroshka sredneuglerodistogo ferromargantsa [Method for obtaining passivated powder of medium carbon ferromanganese] : A.I. 1603649 UdSSR A1, МКИ³ В22 F9/08; claim. 27.10.88; publ. 27.10.89.
5. Method for preparing metal powder : Pat. US6336953 B1. / M. Kikukawa, Sh. Matsunaga, T. Inaba etc ; publ. 01.08.2002.
6. Ternovyi Yu. F., Vodennikov S. A., Panova V. O. Otrymannia poroshkiv zbilshenoї plynnosti rozpylenniam vodoiu vysokogo tysku v umovakh podviinogo povitriano-vodianogo smerchu. (Povidomlennia 1) [Obtaining powders with improved fluidity by high pressure water atomization in conditions of dual air-water spout. Report 1]. *Metallurgia: naukovi pratsi ZDIA*. 2018. vol. 2(40). pp. 33-37.
7. Ternovoy Yu. F., Kudievskiy S. S., Pashetneva N. N. Inzhenernye raschety tehnologicheskikh protsessov raspylenia rasplavlennykh metallov [Engineering calculations of technological processes of atomization of melted melts] : monograph. Zaporozh'e : RIO ZGIA, 2005. 149 p.
8. Kikukawa M., Matsunaga S., Inaba T. Development of spherical fine powders by high pressure water atomization using swirl water jet. *Proc. of 2000 Powder Metallurgy World Congress*. Part 1. Nov. 12-16, 2000. Kyoto (Japan). pp. 363-366.
9. Ternovoi Yu. F., Panova V. O. Vynuzhdennyi teploobmen i skorost' okhlazhdenia kapel' pri raspylenii rasplava vodoj. *Metallurgia: naukovi pratsi ІІ ZNU*. 2019. vol. 1(1). pp. 15-18.

Ternovoy Yurii, professor, doctor of technical sciences, Zaporozhe national university

Baglyuk Gennadii, senior staff scientist, doctor of technical sciences, Frantsevich institute of problem materials technology HASU.

Panova Vera, assistant, Zaporozhe national university.

MADING OF POWDERS WITH THE INCREASED FLUIDITY BY NEBULIZED OF METAL FUSIONS BY WATER OF HIGH-PRESSURE IN THE CONDITIONS OF DOUBLE AIR-HYDRONIC TORNADO

Report 2. Model of atomization

Water atomization of metal melts in a «spout» is a promising method for producing powders of any chemical composition with a spheroid particle shape. This shape is not typical for traditional water atomization. A model explaining and predicting the formation of spheroid powder particles with a size of more than 10 μm during water atomization is absent in the literature. The work based on the well-known model for water atomization of high-temperature melts. Based on this model, as well as taking into account the experimental and literature data, a model of melt atomization by high pressure water in an air-water «spout» has been developed. It is shown that the feature of atomization in «spout» is the fragmentation of metal jet by a rotating gas layer between the melt jet and the water flow, which causes thermophysical conditions leading to the formation of spheroid particles. The characteristics of the gas layer are determined by the technical parameters of the water flow, such as pressure, velocity, impact angle, swirl angle, and affect both the shape of the atomized particles and their size. It is shown that the thickness of the gas layer is of decisive importance. Stable atomization mode with the formation of spheroid particles is ensured by a minimum distance between the melt jet and the rotating water stream, at which the boundary layer of the gas flow has a rate of about 90...100% of the water flow rate. The reasons for the transformation of the shape of the atomized particles at the transition from atomization by an annular nozzle to a «spout» are considered. The main reason is the absence of direct contact between the melt jet and liquid metal droplets with water. With optimal atomization parameters, an increase in the solidification time of the droplets, sufficient for their spheroidization, is achieved. Taking into account the proposed model and technical parameters of atomization, a formula was obtained to predict the median diameter of powder particles.

Стаття надійшла: 06.08.2020 р.

УДК 621.767:531.1

DOI <https://doi.org/10.26661/2071-3789-2020-1-04>

Терновий Юрій Федорович, професор, доктор технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-1078-4430

Лічконенко Наталія Володимирівна, старший викладач, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-7960-061X

ПРО ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ ГАЗУ ТА РОЗПЛАВУ НА РОЗМІР МІКРОГРАНУЛ ЗА ГАЗОВИМ РОЗПИЛЕННЯМ

Розглянуто особливості процесу газового розпилення металевих розплавів за змінюванням температури газу та рідкого металу. Зростання дисперсності мікрогранул під час підвищення температури газу або перегрівання розплаву можна пояснити більш повним проходженням двохстадійного процесу дроблення. Показано, що під час використання підвищеної температури газу та розплаву відбувається зниження масової витрати газу для забезпечення однакової динаміки розпилення.

Ключові слова: газове розпилення, діаметр мікрогранули, температура газу і металу, тиск дуття, час охолодження, дисперсність, дроблення крапель, перегрівання, в'язкість рідкого металу та газу

Технологічний процес виробництва методом порошкової металургії починається з одержання металевих порошків, якісні характеристики яких значною мірою визначаються методом їх виготовлення. У промисловості застосовують різноманітні методи одержання порошків, проте процес газового розпилення рідких металів є одним з найбільш високотехнологічних і продуктивних методів [1-2].

Теоретичні й експериментальні дослідження процесів газового розпилення високо-температурних розплавів виконуються як вітчизняними вченими [3-5], так і за кордоном [6-8]. Процес газового розпилення характеризується створенням двофазних систем «газ - розплавлений метал» і «газ - тверда частка», які в цілому мають назву металогазовий факел. Газом-енергоносієм може бути аргон, азот і повітря. Правильне підбирання енергоносія є необхідною, але недостатньою умовою для одержання порошків із заданими характеристиками. У роботах [9-10] відзначається, що дисперсність порошку залежить від в'язкості, поверхневого натягу та температури розплаву, проте головними чинниками, що істотно впливають на фракційний склад одержаних порошків, є тиск і температура газу-енергоносія [11].

Гаряче дуття на практиці розпилення застосовують досить давно під час розпилювання легкоплавких металів (свинець, олово, цинк, алюміній, припої на основі свинцю тощо) [12]. Конструкції форсунок, що працюють на дутті, температура якого перевищує температуру плавлення металу, що розпилюють, на 373...473 К, описано, наприклад, у роботах [13-14].

Відомими є різноманітні конструктивні вирішення способів розпилення алюмінієвих, магнієвих сплавів підігрітим до температури 873...1073 К азотом з тиском у форсунці 5...6 МПа [15-18]. Розпилення за температури газового потоку, що співпадає з температурою розплаву, є найефективнішим, оскільки в'язкість та поверхневий натяг при цьому не змінюються під час дроблення струменя через відсутність переохолодження розплаву. Але створення таких умов під час розпилення розплавів, які мають високу температуру плавлення (1723...1923 К), ускладнюється через складнощі нагрівання газового дуття та значного дорожчання установок, що розпилюють. Тому за розпиленням, наприклад, жароміцних сплавів застосовують підігрівання газу-енергоносія до температури 673 К.

У ГП «УкрНДІспецсталь» на прикладі нікелевого жароміцного сплаву експериментально показана можливість підвищення виходу порошку фракції –100 мкм на 20% під час розпилення струменя розплаву нагрітим газоподібним аргоном.

У роботі [19] показано, що під час розпилення сплаву ЕП648-ВИ холодним газом середній діаметр часточок складає 76...66 мкм, а під час розпилення гарячим газом можливе одержання часточок із середнім діаметром 34 мкм. Розпилення гарячим газом призводить, окрім зменшення середнього розміру часточок, до зниження кількості дефектних гранул з сателітами, що пов'язано з високою початковою швидкістю газового потоку на виході з форсунки та великим діаметром факела рідкого металу, що утворюється під час якого визначає більш низьку ймовірність зіткнення гранул у процесі кристалізації.

Проте, незважаючи на значну міру довіри до результатів технологічних експериментів, незадовільними та суперечливими залишаються теоретичні уявлення про механізм впливу температури газу і розплаву на процес розпилення.

Мета роботи. Визначення основних теоретичних закономірностей процесу газового розпилення рідких металів з урахуванням впливу як температури газу, так і різниці температур газу та металу.

Основна частина досліджень. У роботі [20] на прикладах срібла, а також сплавів золота і срібла за зростанням температури газу T показано зниження середнього розміру часточок порошку d_k . Розмір часток d_k визначається як

$$d_k \sim \frac{1}{T^{0,25}} ; \quad (1)$$

$$d_k \sim (G_{Me})^{0,5} ; \quad (2)$$

$$G_{Me} \sim T^{0,5} , \quad (3)$$

де G_{Me} – масова витрата металу, кг/с.

Залежність (1) підтверджено також експериментально для випадків однакових значень температури, але різних величин питомих витрат газу. Такі результати пояснюються, по-перше, збільшенням об'ємної витрати газу-енергоносія G_{Me} за рахунок зростання його температури та, по-друге, зростанням кінетичної енергії газового потоку, що сприяє дробленню струменя розплаву на дрібні часточки. Експериментально доведено:

$$d_k \sim \frac{1}{E_{кин}} , \quad (4)$$

де $E_{кин}$ – кінетична енергія газу.

Подібні результати наведено у роботі [21].

У роботах з диспергування розплавів [12,13], на прикладі легкоплавких металів, показано, що нагрівання газу-енергоносія до температури, що перевищує температуру плавлення, призводить до одержання більш тонкодисперсного порошку. Пояснення є таким: процес диспергування розплаву відбувається якнайповніше, тобто здійснюються всі можливі геометричні метаморфози.

При цьому, враховуючи повне, можливе в гідродинамічному сенсі дроблення рідкого металу на останній стадії в цих роботах розглядають додаткове дроблення крапель діаметром d_k , що раніше утворилися, в газовому потоці, відносна швидкість якого становить W_z . Відповідно, критична швидкість:

$$W_{kp} = \left(\frac{8\gamma_{Me}}{\rho_{Me} \cdot d_k} \right)^{0,5} , \quad (5)$$

де γ_{Me} – питома поверхнева енергія розплаву, Дж/м²; ρ_z – щільність газу, кг/м³.

Значення відносної швидкості краплі і газу $W_{кр}$ дозволяє визначити число Вебера We . Залежно від W_2 і визначається руйнування крапель розплаву, що утворюються на першому етапі [22], або на 2...3 нові краплі, або на безліч крапель на другому етапі [12].

Причому рівняння (5) є справедливим, коли час охолодження до початку кристалізації краплі перевищує час її критичної деформації $\tau_{деф}$:

$$\tau_{охл} > \tau_{деф} . \quad (6)$$

Для сферичної краплі:

$$\tau_{охл} = \frac{c_{Me} \cdot \rho_{Me} \cdot d_k}{6\alpha} \cdot \ln \left(\frac{T_{Me} - T_{\Gamma}}{T_{кр} - T_{\Gamma}} \right) ; \quad (7)$$

$$\tau_{деф} = \frac{1,65 d_k}{W_{\Gamma}} \cdot \left(\frac{\rho_{Me}}{\rho_{\Gamma}} \right)^{0,5} ; \quad (8)$$

$$\alpha = Nu \cdot \lambda_{\Gamma} \cdot d_k , \quad (9)$$

де c_{Me} , ρ_{Me} , T_{Me} – теплоємність кДж/(кг·К), щільність, кг/м³ і температура, К, розплаву; α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); Nu – критерій Нуссельта; λ_{Γ} – теплопровідність газу, Вт/(м·К).

Під час нагрівання газу його щільність (за постійним тиском дуття) знижується, що призводить до необхідності збільшення критичної швидкості. Швидкість газу також зростає з підвищенням його температури T_{Γ} :

$$W_{\Gamma} \sim T_{\Gamma}^{0,5} . \quad (10)$$

Таким чином, із зростанням температури, але збереженні тиску дуття справедливим є рівняння:

$$W_{кр} \cdot \rho_{\Gamma}^{0,5} = \text{const} . \quad (11)$$

Тоді, за однаковим тиском дуття

$$E_{кін} \approx \rho_{\Gamma} \cdot W_{\Gamma}^2 \neq E_{кін}(T_{\Gamma}) . \quad (12)$$

З рівняння (12) виходить, що кінетична енергія газу не залежить від його температури із збереженням постійного тиску дуття.

Проте, результати експериментів на ГП «УкрНДІспецсталь», ASL, ІПМ НАНУ показують зростання дисперсності порошку з підвищенням температури газу. Які є закономірності та в чому причини цього явища?

Вплив температури. Розглянемо випадок, коли тиск дуття не змінюється, а змінюється тільки температура газу. Тоді маємо випадок (12) – збереження кінетичної енергії та зниження витрати газу:

$$G_{\Gamma} = \rho_{\Gamma} \cdot W_{\Gamma} \cdot F_c \sim \frac{1}{T} \cdot T^{0,5} , \quad (13)$$

де F_c – площа перерізу сопла, м.

Незмінність $E_{кін}$ свідчить про незалежність розміру крапель від температури за постійним тиском P з точки зору впливу її на фізичні параметри процесу. В той же час, враховуючи рівняння (13), згідно з роботою [21] повинен підвищитися розмір крапель d_k , оскільки питома витрата газу знижується. Реально, за виконанням умов $P=\text{const}$; $T=\text{var}$, спостерігається не ідентичний, а менший розмір розпилених часточок. За цих умов в экс-

перименті маємо $d_{\kappa}(T_{\max}) < d_{\kappa}(T_{\min})$, що можна пояснити тільки більш повним проходженням процесу дроблення під час тривалішого перебування фрагментів розплаву в гарячому газі.

Принцип еквівалентності. З точки зору повноти проходження процесу дроблення, можна розглянути випадок однакового часу охолодження часточок розплаву, яке реалізується за однакової різниці температур металу (T_{Me}) і газу (T_{Γ}).

Дійсно, за виконанням умови $\Delta T_1 = \Delta T_2$ час охолодження $\tau_{охл}$ є однаковим

$$\tau_{охл} = \frac{c_{Me} \cdot \rho_{Me} \cdot d_{\kappa}}{6\alpha} \cdot \ln \left(\frac{T_{Me} - T_{\Gamma}}{T_{кр} - T_{\Gamma}} \right) = \frac{c_{Me} \cdot \rho_{Me} \cdot d_{\kappa}}{6\alpha} \cdot \ln \left(1 + \frac{\Delta T}{T_{кр} - T_{\Gamma}} \right). \quad (14)$$

З рівняння (14) виходить, що за $\tau_{охл,1} = \tau_{охл,2}$, коли виконується умова:

$$1 + \frac{\Delta T_1}{T_{кр} - T_{\Gamma}} = 1 + \frac{\Delta T_2}{T_{кр} - T_{\Gamma}} = \text{const}. \quad (15)$$

Звідки

$$\Delta T_1 = \text{const} (T_{кр} - T_{\Gamma}). \quad (16)$$

Виходячи з рівняння (15), розглянемо як приклад випадок, коли перегрівання металу є стандартним і складає 100 К, $T_{кр} = 1300$ К, $T_{\Gamma} = 300$ К. При цьому маємо $\text{const} = 100/1000 = 0,1$.

Підвищити тривалість процесу охолодження можна двома способами: шляхом нагрівання металу або нагрівання газу (табл. 1 і 2).

Таблиця 1 – Час охолодження часток розплаву за $T_{кр} = 1300$ К, $\Delta T = 100$ К

T_{Γ} , К	300	400	500	600	700	800
$1 + \frac{\Delta T_2}{T_{кр} - T_{\Gamma}}$	1,100	1,111	1,125	1,143	1,167	1,200

Таблиця 2 – Час охолодження часток розплаву за $T_{кр} = 1300$ К, $T_{\Gamma} = 300$ К

ΔT_1 , К	100	120	140	160	180	200
$1 + \frac{\Delta T_2}{T_{кр} - T_{\Gamma}}$	1,100	1,120	1,140	1,160	1,180	1,200

З аналізу табл. 1 і 2 видно, що нагрівання газу з 300 К до 600 К збільшує час охолодження в тій же мірі, що і нагрівання металу до температури, що перевищує температуру кристалізації на 140 К замість 100 К. В цьому і полягає принцип еквівалентності диспергування.

Вплив в'язкості нагрітого газу. Для рідкометалевого утворення сфероїдальної форми справедливим є вирівнювання

$$\tau_{охл} = \frac{c_{Me} \cdot \rho_{Me} \cdot d_{\kappa}}{6\alpha} \cdot \ln \left(\frac{T_{Me} - T_{\Gamma}}{T_{кр} - T_{\Gamma}} \right). \quad (17)$$

Очевидно, що $\tau_{охл} = \tau_{охл}(T_{\Gamma})$, але і $\tau_{охл} = 1/\alpha$, де коефіцієнт тепловіддачі α , за рахунок вимушеної конвекції опосередковано через число Рейнольдса Re , залежить від температури, оскільки містить коефіцієнт в'язкості ν_{Γ} , тобто

$$\alpha = \frac{\lambda_{\Gamma} \cdot Nu}{x}; \quad (18)$$

$$Nu = 2 (1 + 0,27 Pr^{1/3} \cdot Re^{1/2}); \quad (19)$$

$$Pr^{1/3} = 1 ; \quad (20)$$

$$Re = \frac{W_r}{\nu_r} ; \quad (21)$$

$$\alpha \sim Nu \sim \nu_r^{-0,5} ; \quad (22)$$

$$\tau_{охл} \sim \frac{1}{\alpha} \sim \nu_r^{0,5} ; \quad (23)$$

$$\nu_r \sim T_r^{0,5} ; \quad (24)$$

$$\tau_{охл} \sim T_r^{0,25} . \quad (25)$$

З урахуванням рівняння (19) маємо:

$$\tau_{охл} \approx T_r^{0,25} \cdot \ln \left(1 + \frac{\Delta T}{T_{кр} - T_r} \right) . \quad (26)$$

З виразу (27) витікає, що із зростанням температури газу значення $\tau_{охл}$ збільшується, у тому числі за рахунок залежності в'язкості газу від температури. Згідно з роботою [12] $d \sim \nu_r^{0,45}$, що суперечить роботі [23]: $d \sim \nu_r^{-0,5}$, тобто $d \sim T_r^{-0,25}$.

Таким чином, розрахунки показують, що підвищення температури у два рази призводить до зниження розміру крапель приблизно на 15%.

Економія нагрітого газу під час розпилення. Витрату газу через сопло форсунки визначають за формулою:

$$G_r = \rho_r \cdot W_r \cdot F_c . \quad (27)$$

де F_c – площа перерізу сопла на виході.

За підвищенням температури газу справедливим є $W_r \sim T_r^{0,5}$. В той же час з рівняння Менделєєва-Клапейрона

$$p \cdot V = \frac{m}{\mu} \cdot K \cdot T_r ; \quad (28)$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{P \cdot M}{K \cdot T_r} \sim \frac{1}{T_r} . \quad (29)$$

Звідки за незмінним тиском (P) дугтя :

$$G_r \approx \frac{F \cdot T_r^{0,5}}{T_r} \approx \frac{F}{T_r^{0,5}} . \quad (30)$$

Цим і пояснюється економія газу під час розпилення.

Для конкретного випадку (для конфузора) залежність витрати газу від температури та тиску має вигляд:

$$G_r \approx \frac{1}{T_r^{0,5}} \cdot \left(1 + \frac{P}{P_0} \right)^{\frac{0,5(k-1)}{k}} . \quad (31)$$

Тобто існує такий тиск розпилення P_i , який із зростанням температури до T_i зберігає незмінною витрату газу.

У роботі [24] подано відому залежність, що маж вигляд

$$d_k \sim G_r^{-2,3} \cdot \rho_r^{-0,17} . \quad (32)$$

З урахуванням вищесказаного отримуємо залежність дисперсності порошку від температури за постійним тиском:

$$d_k \sim T_r^{-0,15} \cdot T_r^{-0,17} \sim T_r^{-0,32} . \quad (33)$$

Висновки. Вивчення закономірностей газового розпилення у даному випадку дозволяє стверджувати, що:

– під час розпилення на першій стадії розпаду «струмінь – плівка, мікрострумені – первинні краплі» нагрівання газу не впливає на дисперсність. Після створення первинних крапель, на другій стадії залежно від числа Вебера відбувається інтенсивна тепловіддача до газу та допускається динамічна дія на краплі, що розширює факел розпилення та сприяє вторинному дробленню крапель. Для розпилення на першій стадії характерний масштаб: довжини – 0,01 м, часу – $10^{-4} \dots 10^{-5}$ с; на другій стадії довжина складає 0,1...-1,0 м, час 0,01...0,001 с;

– незважаючи на відому залежність в'язкості від температури $\nu_r = T_r^{0,5}$ і суперечливі дані про вплив в'язкості газу на розмір розпиленних крапель, можна стверджувати про слабку залежність $d_k \neq d_k(\nu_r) \neq d_k(T_r)$. У кращому разі підвищення температури газу в два рази знижує розмір часточок порошку на 15% за рівнянням роботи [24], проте впливає на дисперсність згідно з роботою [23] тільки за рахунок вторинного дроблення;

– час до початку кристалізації або час, необхідний для повного розкладання рідкокристалічних утворень, залежить як від температури газу, так і від температури перегрітого розплаву, тобто для одержання однакового часу охолодження, згідно з принципом еквівалентності, можна підвищувати або температуру розплаву, або температуру дуття;

– під час використання нагрітого газу відбувається економія масової витрати газу для забезпечення однакової динаміки розпилення.

Таким чином, розуміння механізму впливу температури газу та розплаву на розмір мікрогранул порошку сприяє встановленню оптимальних технологічних режимів газового розпилення високотемпературного розплаву та розробці надійних методів управління таким процесом.

Бібліографічний перелік

1. Газовое распыление для производства металлических порошков. *Новости порошковой металлургии*. 2008. № 3. URL: http://www.netramm.com/news_rm_3 нетрамм распыление газом.pdf (дата звернення 12.07.2020).
2. Терновой Ю. Ф., Кудиевский С. С., Пашетнева Н. И. Инженерные расчеты технологических процессов распыления расплавленных металлов. Запорожье : РИО ЗГИА, 2005. 149 с.
3. Глотка О. А., Овчинников О. В. Аналіз вітчизняних жароміцних порошків на нікелевій основі, які застосовують в адитивних технологіях. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2016. № 2. С. 39-42.
4. Павленко Д. В., Бондаренко С. Г. Исследование способов управления гранулометрическим составом металлических порошков при их получении методом газодинамического распыления расплавов. *Космічна наука і технологія. Додаток*. 2002. № 1. С. 132-135.
5. Педаш А. А., Клочихин В. В., Лысенко Н. А. Влияние технологий изготовления металлических порошков на структуру и свойства деталей, полученных селективным лазерным плавлением. *Вестник двигателестроения*. 2019. № 2. С. 31-39.
6. Лыков П. А., Сафонов Е. В., Броммер К. А., Шульц А. О. Получение металлических микропорошков газодинамическим распылением. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение»*. 2012. № 33. Вып. 20. С. 107-112
7. Dowson A. G. Recent development in powder metallurgy. *Metall and Metall-form*. 1974. Vol. 41. No 6. P. 132-148.

8. Wiggers H., Koster S., Walzel P. Experiments to liquid metal atomization with a new prefilming nozzle. Proceedings of International Conference on Spray Deposition and Melt Forming. Bremen Universitat. 2000. P. 569-578.
9. Грацианов Ю. А., Путимцев В. В., Силаев А. Ф. Металлические порошки из расплавов. Москва : Металлургия, 1970. 245 с.
10. Силаев А. Ф. О влиянии перегрева металлических расплавов при распылении газовым потоком на дисперсность и структуру порошка. Запорожье, 1965. 44 с.
11. Лыков П. А., Бромер К. А., Рошин В. Е., Брындин С. А. Определение технологических параметров получения металлических ультрадисперсных порошков. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия»*. 2011. Вып. 14. С. 17-19.
12. Ничипоренко О. С., Найда Ю. И., Медведовский А. Б. Распыленные металлические порошки. Киев : Наукова думка, 1980. 240 с.
13. Найда Ю. И., Ничипоренко О. С., Шашмулин В. А. Усовершенствование технологии производства порошков олова на заводе «Рязцветмет». *Порошковая металлургия*. 1975. № 11. С. 94-97.
14. Форсунка для распыления жидких металлов. А. с. 500903 СССР, МКИ В 22F 9/00. В 22D 23/08. В 05B 1/00. № 2054322/22-1. Заявлено 12.08.74.
15. Способ получения высокодисперсного сферического алюминиевого порошка. Патент РФ 2022715, МПК В 22F 9/08. № 4936976/02. Заявлено 16.05.91.
16. Алюминиевый сферический порошок высокой дисперсности и способ его получения. Патент РФ 2243857, МПК В 22F 9/08. № 2002124028/02. Заявлено 09.09.02.
17. Технологическая инструкция по производству первичного, сферического, дисперсного, высокодисперсного и с присадкой титана и кремния пульверизаторов распылением расплавленного алюминия азотом в отделении 2 предприятия ООО «СУАЛПМ». ТИ 48010636110. Шелехов, 2010. 48 с.
18. Способ распыления расплавленных порошков. Патент РФ 2508964. МПК В 22F 9/08. № 2012150658/02. Заявлено 26.11.12.
19. Евгенов А. Г., Неруш С. В., Василенко С. А. Получение и опробование мелкодисперсного металлического порошка высокохромистого сплава на никелевой основе применительно к лазерной LMD-наплавке. *Труды ВИАМ*. 2014. № 3. URL : [https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-melkodispersnogo-metallichesкого-poroshka-zharoprochnogo-splava-marki-ep648-vi-primenitelno-k-lazernoy-lmd-naplavke-a-takje-otsenka-kachestva-naplavki-poroshkovogo-materiala-na-nikelevoy-osnove-na-%20\(2\).pdf](https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-melkodispersnogo-metallichesкого-poroshka-zharoprochnogo-splava-marki-ep648-vi-primenitelno-k-lazernoy-lmd-naplavke-a-takje-otsenka-kachestva-naplavki-poroshkovogo-materiala-na-nikelevoy-osnove-na-%20(2).pdf).
20. Strauss J. T., Dunkley J. J. An experimental and empirical study of clouse-coupled gas atomization. *Congress «World Powder Metallurgy»*.
21. Dunkley J. J. An analysis of the Gas Atomization Process. *Conference «Euro Powder Metallurgy»*. 2002.
22. Терновой Ю. Ф., Пашетнева Н. И., Манегин Ю. В. Физико-математическая модель процесса газового распыления струи расплава. *Порошковая металлургия*. 1992. № 3. С. 11-15.
23. Lubanska H. Correlation of Spray Ring Data for Gas Atomization of Liquid Metals. *Journal of Metals*. 1970. Vol. 2. № 22. P. 45-49.
24. Терновой Ю. Ф., Пашетнева Н. И. Внутренняя пористость в частицах распыленного порошка сплава на никелевой основе. *Порошковая металлургия*. 1990. № 1. С. 43-47.

References

1. Gazovoe raspylenie dlya proizvodstva metallicheskih poroshkov Novosti poroshkovoy metallurgii. 2008. No 3. URL: http://www.netramm.com/news_pm_3_netramm_taspylenie_gazom.pdf распыление газом.pdf (data zvernennya 12.07.2020).
2. Ternovoy Yu. F., Kudievskiy S. S., Pashetneva N. N. Inzhenernye raschety tehnologicheskikh protsessov raspylenia rasplavlennykh metallov [Engineering calculations of technological processes of atomization of melted melts] : monograph. Zaporozh'e : RIO ZGIA, 2005. 149 p.
3. Glotka O. A., Ovchinnikov O. V. Analiz vichyznyanykh zharomitsnykh poroshkiv na nikelivii osnovi, yaki zastosovuyutsya v adytyvnykh tekhnologiyakh. *Novi materially i tekhnologii v metallurgii ta mashinobuduvanni*. 2016. no. 2. pp. 39-42.

4. Pavlenko D. V., Bondarenko S. G. Issledovanie sposobov upravleniya granulometricheskim sostavom metallicheskih poroshkov pti ikh polucheniya metodom gazodinamochoeskogo paspyleniya pasplavov. *Kosmichna nauka I tekhnologiya. Dodatok*. 2002. no. 1. pp. 132-135.
5. Pedash A. A., Klochkhin V. V., Lysenko N. A. Vliyanie tekhnologii izgotovleniya metallicheskih poroshkov na strukturu i svoystva detaley, poluchennykh selektivnym lazernym plavleniem. *Vestnik mashinostroeniya*. 2019. no. 2. pp. 31-39.
6. Lykov P. A., Safonov E. V., Bromer R.A., Shul'ts A. O. Poluchenie metallicheskih mikroporoshkov gazodinamicheskim raspyleniem. *Vestnik YuUrFU. Seriya «Mashinostroenie»*. 2012. vol. 20. no. 33. pp. 107-112.
7. Dowson A. G. Recent development in powder metallurgy. *Metall and Metall-form*. 1974. vol. 41. no. 6. pp. 132-148.
8. Wiggers H., Koster S., Walzel P. Experiments to liquid metal atomization with a new prefilming nozzle. Proceedings of International Conference on Spray Deposition and Melt Forming. Bremen Universitat. 2000. pp. 569-578.
9. Gratsianov Yu. A., Putimtsev V.V., Silaev A. F. Metallicheskie poroshki iz rasplavov. Moskva. Metallurgiya, 1970. 245 p.
10. Silaev A. F. O vliyanii peregreva metallicheskykh rasplavov pri raspylenii gazovym potokom na dispersnost' I strukturu poroshka. Zaporozh'e, 1965. 44 p.
11. Lykov P. A., Bromer K. A., Roshchin V. E. Bryndin S. A. Opredelenie tekhnologicheskikh parametrov polucheniya metallicheskih ul'tradispersnykh poroshkov. *Vestnik YuUrFU. Seriya «Mashinostroenie»*. 2011. vol. 14. no. 32. pp. 17-19.
12. Nichiporenko O. S., Naida Yu. I., Medbedovskii A. B. Paspylennye mmetallicheskie poroshki. Kiev : Naukova dumka, 1980. 240 p.
13. Naida Yu. I., Nichiporenko O. S., Shamshurin V. A. Usonershenstvovanie tekhnologii proizvodstva poroshkov olova na zabode «Ryaztvetmet». *Poroshkovaya metallurgiya*. 1975. no. 11. pp. 94-97.
14. Forsunka dlya raspyleniya zhidkikh metallov. A.I. 500903 USSR, MKI B 22F 9/00. B 22D 23/08. B 05B 1/00. No 2054322/22-1. Zayavleno 12.08.74.
15. Sposob polucheniya vysokodispersnogo sfericheskogo alyuminievogo poroshka. Pat. RF 2022715, MPK 22F 9/08. no. 4936976/02. Zayavleno 16.05.91.
16. Alyuminievy sfericheskiy poroshok dysokoy dispersnosti i sposob ego polucheniya. Pat. RF 2243857, MPK B 22F 9/08. No 2002124028/02. Zayavleno 09.09.02.
17. Tekhnologicheskaya instruktsiya po proizvodstvu pervichnogo sfericheskogo dispersnogo, vysokodispersnogo i s prisadkoy titana i kremniya pul'verizzatorov raspyleniya rasplavlennogo alyuminiya azotom v otdelenii 2 predpriyatiya OOO «SUALPM». TI 48010636110. Shelekhov, 2010. 48 p.
18. Sposob raspyleniya rasplavlennykh poroshkov. Pat RF 2508964. MPK B 22F 9/08. n.o. 2012150658/02. Zayavleno 26.11.12.
19. Evgenov A. G., Nerush S. V., Vasilenko S. A. Polychenie i oprobovanie melkodispersnogo metallicheskogo poroshka vsokokhromistogo splava na nikelvoy osnove primenitel'no k lazernoy LMD-naplavke. *Trudy VIAM*. 2014. No 3. URL: [https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-melkodispersnogo-metallicheskogo-poroshka-zharoprochnogo-splava-marki-ep648-vi-primenitelno-k-lazernoy-lmd-naplavke-a-takje-otsenka-kachestva-naplavki-poroshkovogo-materiala-na-nikelvoyo-osnove-na-%20\(2\).pdf](https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-melkodispersnogo-metallicheskogo-poroshka-zharoprochnogo-splava-marki-ep648-vi-primenitelno-k-lazernoy-lmd-naplavke-a-takje-otsenka-kachestva-naplavki-poroshkovogo-materiala-na-nikelvoyo-osnove-na-%20(2).pdf).
20. Strauss J. T., Dunkley J. J. An experimental and empirical study of clouse-coupled gas atomization. *Congress «World Powder Metallurgy»*.
21. Dunkley J. J. An analysis of the Gas Atomization Process. *Conference «Euro Powder Metallurgy»*. 2002.
22. Ternovoy Yu. F., Pashetneva N. I., Manegin Yu. V. Fiziko-matematicheskaya model' protsessa gazovogo raspyleniya stryi rasplava. *Poroshkovaya metallurgiya*. 1992. no. 3. pp. 11-15.
23. Lubanska H. Correlation of Spray Ring Data for Gas Atomization of Liquid Metals. *Journal of Metals*. 1970. vol. 2. no. 22. pp. 45-49.

-
24. Ternovoy Yu. F., Pashetneva N. I. Vnutrnnnyaya poristost' v chastitsakh raspylennogo splava na nikelvovoy osnove. *Poroshkovaya metallurgiya*. 1990. no. 1. pp. 43-47.

Ternovoy Yurii, professor, doctor technical sciences, Zaporozhe national university.

Lichkonenko Natalya, senior teacher, Zaporozhe national university.

ABOUT INFLUENCE OF TEMPERATURE GAS AND FUSION ON SIZE OF MICROGRANULES AT GAS DISPERSION

Spraying liquid metals today is one of the most high-tech and productive methods for producing high-quality metal powders. Earlier theoretical and experimental studies have established that the dispersion of a powder depends on the viscosity, surface tension and temperature of the melt; however, the main factors affecting the fractional composition of the resulting powders are the pressure and temperature of the energy carrier gas. When non-ferrous metals and alloys sprayed, designs of nozzles operating on a blast, the temperature of which exceeds the melting temperature of the sprayed metal by 100-200 °C, have long been used. And when spraying, for example, heat-resistant alloys, heating of the energy carrier gas up to 400 °C is used. In this case, there is an increase in the dispersion of the obtained microgranules; however, the theoretical prerequisites for this phenomenon are not fully understood. Therefore, the aim of this work was to refine the theoretical concepts of the mechanism of the influence of the temperature of the gas and melt on the size of the particles obtained. It was found that the dependence of the particle size on the gas viscosity is rather weak. Calculations show that a two-fold increase in temperature leads to a decrease in droplet size by about 15%. Therefore, the increase in the dispersion of microgranules with an increase in the gas temperature or overheating of the melt can only be explained by a more complete passage of the process of secondary crushing of drops, which is realized due to a longer stay of the fragments of the melt in hot gas. According to the principle of equivalence, the duration of cooling can be increased in two ways: by heating the metal or by heating the gas. It is shown that when using elevated gas and melt temperatures, the gas mass flow rate decreases to ensure the same sputtering dynamics.

Стаття надійшла: 31.07.2020 р.

УДК 669:658.56

DOI <https://doi.org/10.26661/2071-3789-2020-1-05>

Серета Борис Петрович, завідувач кафедри, професор, доктор технічних наук, Дніпровський державний технічний університет, Каменське. ORCID: 0000-0002-9518-381X

Муковська Дар'я Яківна, аспірант, Дніпровський державний технічний університет, Каменське

ГОЛОВНІ АСПЕКТИ РЕЦИКЛІНГУ ВІДХОДІВ МЕТАЛУРГІЙНИХ ПІДПРИЄМСТВ НА ПРИКЛАДІ ПРОМИСЛОВОСТІ ПІВДНЯ УКРАЇНИ

Виконано огляд основних процесів рециклінгу технологічних відходів головного виробництва металургійних підприємств, зокрема, металургійного шлаку. Розглянуто головні аспекти функціонування цеху переробки шлаків металургійного підприємства півдня України. Визначено основні завдання та виробничі функції, структура, потужності, виробничі показники цеху переробки шлаків. Наведено обсяг, структура, основних виробничих показників цеху переробки шлаків за дванадцять послідовних місяців. Показано доцільність використання продуктів переробки шлаків у власному виробництві.

Ключові слова: кар'єр, металургійні шлаки, шлакові відвали, рециклінг, технологічні відходи, основне виробництво, доменні шлаки, мартенівські шлаки

Постановка проблеми. Технологічні процеси, що пов'язані з виробничою діяльністю промислових підприємств, супроводжуються утворенням значної кількості відходів виробництва, які представляють собою залишки матеріалів сировини та напівфабрикатів, які утворюються у процесі виробництва продукції та частково або повністю втратили свої якості та не відповідають встановленим стандартам [1].

За можливістю використання розрізняють утилізовані та не утилізовані відходи виробництва. Для перших існує технологія переробки та залучення до виробничого обороту, а для других вона на даний час є відсутньою [2].

Із всієї кількості відходів, що утворюються на території України найбільший обсяг приходить на підприємства гірничо-металургійного комплексу (більше ніж 120 млн. т на рік), зокрема, на металургійні підприємства приходить близько 25 % [3]. Річні обсяги відходів металургійного виробництва складають: доменних шлаків – 5,44 млн. т; сталеплавильних шлаків – 2,92 млн. т; сталеплавильних шлаків – 965 тис. т; окалини – 307,78 тис. т [4].

У зв'язку з вищенаведеним перед вітчизняними металургійними підприємствами постає питання удосконалення процесів рециклінгу – комплексної переробки відходів виробництва з подальшим витяганням з них корисних компонентів для використання у виробничій діяльності [5].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Ступінь використання та залучення до виробничих процесів відходів в якості вторинної сировини залежить від технологічного рівня підприємства та пріоритетів його промислової політики [6]. Так, за 2016 рік у чорній металургії України було утилізовано 88,3% технологічних відходів, приблизно 30% з яких було використано повторно під час технологічного процесу виплавлення сталі [7].

Відомо, що металургійний шлак є головним джерелом одержання залізовмісних відходів. Так, на вітчизняних металургійних підприємствах, згідно з роботою [8], утворення металургійного шлаку складає 57...63% від загальної кількості відходів. Металургійні шлаки представляють собою технологічні відходи, що утворюються за умов високих температур внаслідок фізико-хімічної взаємодії компонентів вихідних твердих матеріалів та газового середовища та є відходами доменного та сталеплавильного виробництва [9,10]. Шлаки є багатокомпонентними системами, до їх складу входять невелика кількість сполук цільових металів, оксиди кальцію, кремнію, алюмінію, магнію та ін. Масова частка заліза

у доменних шлаках складає до 5 % у вигляді корольків, сталеплавильні вміщують 10...15% заліза [11].

Вихід металургійних шлаків є досить значним: від 10 до 40% [12]. Так, на одну тону виплавленого металу його кількість складає 270 кг доменних, 120 кг конверторних і 160 кг мартенівських шлаків. Таким чином, шлаки є найбільш великотоннажними твердими відходами металургії [13].

Металургійні шлаки створюються у доменному та сталеплавильному виробництві. Ступінь їх утилізації у процесі доменного виробництва здебільшого залежить від технологічного процесу підприємств та складає від 80 до 100% [14]. Так, наприклад, за результатами аналізу виробничого процесу було визначено ступінь рециклінгу основних технологічних відходів, який складає для доменного шлаку – 53%, для мартенівського – 58%. Металургійні шлаки, які не утилізуються у виробничому циклі чи тимчасово зберігаються, очікуючи на переробку розміщуються у структурних підрозділах переробки шлаків [15].

Основним засобом переробки доменного шлаку є грануляція, тобто процес переробки розплаву шлаку на гранули шляхом швидкого охолодження водою, повітрям, паром чи іншим газом [16]. Часто гранульовані шлаки застосовують у будівельній галузі. Більшість шлаків можна використовувати під час виготовлення шлакового щебеню, шлакової пемзи та цементу. Окрім того, якщо гранульовані шлаки доменного виробництва комбінувати з менш міцними матеріалами, то такими матеріалами можна замінити асфальтобетонні суміші. Застосування доменного шлаку під час виробництва портландцементу та інших будівельних матеріалів дає змогу заощаджувати первинні мінеральні ресурси (пісок, вапно, глину, щебінь), клінкерний цемент та понизити паливо-енергетичні витрати виробництва майже у двічі [17].

З відвального доменного шлаку за допомогою дробильного обладнання виготовляють піщано-щебеневі суміші. У ПАТ «Маріупольський металургійний комбінат імені Ілліча» функціонує дробильне обладнання власної розробки для виготовлення піщано-щебених сумішей. Більш удосконаленим засобом переробки відвального шлаку є одержання фракційного щебеню. Таку продукцію виготовляють на дробильно-сортувальних комплексах, що дають змогу не тільки дробити відвальний шлак, а й розділяти подрібнений матеріал за фракціями. Сучасні дробильно-сортувальні комплекси, як правило, обладnano магнітними сепараторами для витягування скрапу, що вміщує залізо. Так, наприклад на ПАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь» виробнича потужність такого комплексу дає змогу переробляти більше половини створеного на комбінаті доменного шлаку. Оскільки, частину шлаку поточного виробництва піддають гранулюванню, то переробляють і раніше накопичені відвали [18].

Шлаки, що мають у своєму складі значну кількість сполук оксидів кальцію та фосфору, можна використовувати як добриво, а також для покращення структури ґрунтів. Їх подальша переробка полягає у подрібненні шлаків до розмірів 20 мм з одночасною магнітною сепарацією [19].

На відміну від доменних шлаків сталеплавильні шлаки поточного виробництва через нестійку структуру в будівельній галузі практично не використовують. Через значний вміст оксидів кальцію та заліза такі шлаки більшою мірою ніж доменні є схильними до гідратії [20]. Побічним продуктом сталеплавильних шлаків є розплав оксидів, які містяться у чавуні та металургійному ломі [21]. Окрім застосування шлаків у будівельній галузі їх застосовують у власному виробництві, як витягування матеріалів, що містять метал, який є необхідним для основного металургійного виробництва [22]. Так, кінцевим результатом переробки доменного шлаку може бути скрап чавуну, а результатом переробки мартенівського шлаку – різноманітні залізозмісні відходи [23].

Виклад основного матеріалу. На виробництві підприємства ПАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь» переважну частину відходів, що вміщують метал, якого створено у виробничому циклі, складають металургійні шлаки, а саме доменні та мартенівські, які займають величезні площі та, взаємодіючи з навколишнім середовищем, здійснюють шкоду довкіллю.

Технологічні відходи виробництва, які не утилізують у виробничому циклі або тимчасово зберігають, очікуючи на переробку, розміщують у цеху переробки шлаків.

Цех переробки шлаків є структурним підрозділом металургійного підприємства, яке організує та забезпечує приймання, вивантаження та складування доменних, мартенівських шлаків поточного виробництва та відходів цехів підприємства, грануляції (зливу рідкого доменного шлаку на гран басейні) та відвантаження споживачам доменного (гранульованого) шлаку за затвердженим план-графіком. Також у цеху переробки шлаків виконують витягування чавуну із доменних шлаків, витягування скрапу сталюого та доменного присадків із мартенівських шлаків.

З'являється можливість реалізації переробленого фракційного шлаку споживачам для будівництва доріг та інших потреб, а також для звільнення площ для складування відходів. Це дозволяє понизити витрати на зберігання відходів, забезпечити виробництво вторинного металу й одержати додатковий прибуток від продажу шлаку, переробленого на щебінь, пісок або інші будівельні матеріали.

Цех переробки шлаків включає в себе ділянку гран-басейну та площадки зневоднення гранульованого шлаку, а також ділянки переробки доменних шлаків і мартенівських шлаків.

Ділянка гран-басейну та площадки зневоднення гранульованого шлаку забезпечують виробництво, складування, зневоднення гранульованого доменного шлаку та його відвантаження споживачам. Рідкий доменний шлак прямує у ковшах на гран-басейн, де його зливають у секції басейну, завантажують майданчик зневоднення гранульованого шлаку, а ковшові залишки направляють на ділянку переробки доменних шлаків. На майданчику зневоднення гранульований шлак завантажують у вагони та направляють споживачам.

Ділянка переробки доменних шлаків виконує витягування скрапу з доменних шлаків, забезпечує кантівку ковшів з рідким доменним шлаком, вилучення залишків шлаку з ковшів після його зливання у гран-басейні, відбирання з тупиків шлаку та його перевезення й складування.

Ділянка переробки мартенівських шлаків забезпечує витягування сталюого скрапу з мартенівських шлаків, виконує витягування металовмісних відходів, сортування шлаку за фракціями, забезпечує відбирання від тупиків мартенівського шлаку та інших відходів виробництва, складування їх у відвал.

Основними виробничими показниками цеху переробки шлаків є кінцеві продукти їх переробки, а саме скрап чавуну, шлак фракціями 0...10 мм, шлак фракціями 10...40 мм, шлак фракціями 60...150 мм, шлак рядовий. Скрап чавуну застосовують в основному виробництві, а фракційний та рядовий шлак використовують для загально-будівельних робіт. Структуру та обсяги продуктів переробки доменних шлаків подано на рис. 1.

Кінцевими продуктами переробки мартенівських шлаків є металовмісні відходи (МОС) та мартенівський шлак фракції 10...60 мм, які здебільшого застосовують у власному виробництві. Структуру та обсяги продуктів переробки мартенівських шлаків подано на рис. 2.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Металургійні шлаки є небажаними, але й неминучими на даний час продуктами діяльності металургійних підприємств. Аналізуючи сказане вище, можна зробити висновки, що використання технологічних відходів вирішують комплекс питань щодо зниження техногенного навантаження на розта-

шовані поблизу території, зменшують потребу первинної сировини, зменшують забруднення навколишнього середовища, скорочують земельні площі накопичення технологічних відходів. Тому рециклінг технологічних відходів є доцільним не тільки з економічної, а і з екологічної точки зору.

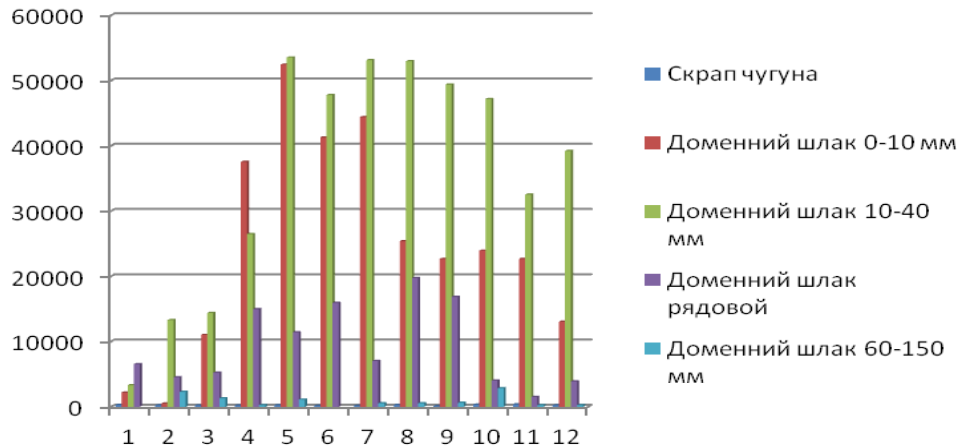


Рисунок 1 – Структура та об'єми продуктів переробки доменних шлаків за дванадцять послідовних місяців, тис. т

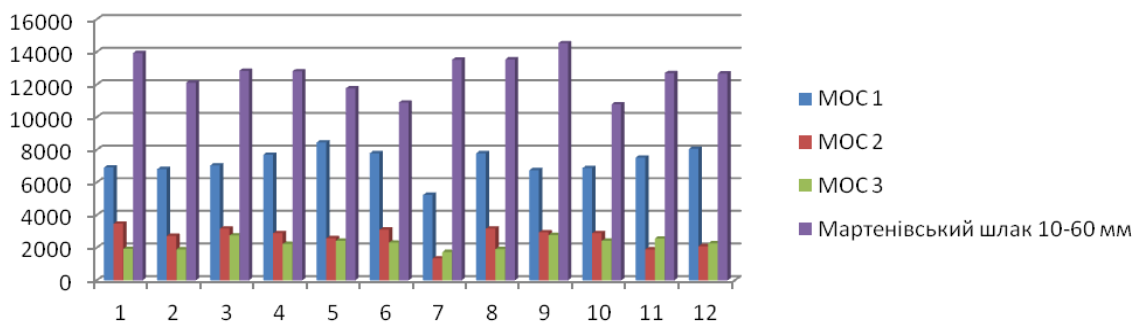


Рисунок 2 – Структура та об'єми продуктів переробки доменних шлаків за дванадцять послідовних місяців, тис. т

Проаналізовано головні аспекти рециклінгу металургійних підприємств, розглянуто функціонування цеху переробки шлаків металургійного підприємства півдня України. Описано виробничі функції, структуру та потужності цеху. Наведено обсяг, структура, основних виробничих показників переробки шлаків за дванадцять послідовних місяців.

Загальна кількість кінцевих продуктів переробки доменних шлаків склала – 856 тис. т, а продуктів переробки мартенівських шлаків – 299 тис. т.

Таким чином застосування заходів щодо рециклінгу технологічних відходів основного виробництва дають змогу частково розв'язати проблему дефіциту залізорудної сировини та покращити екологічну ситуацію у регіоні.

Бібліографічний перелік

1. Валуев Д. В., Гизатулин Р. А. Технологии переработки металлургических отходов. Томск: ТПУ, 2012. 196 с.
2. Копач П. І., Чілій Д. І. Аналіз процесів відходоутворення на виробництвах гірничо-металургійного комплексу. *Екологія та природокористування*. 2012. Вип.15. С. 118-132.
3. Демидик В. Н. Устойчивое развитие и рециклінг отходов в черной металлургии. *Металл и литье Украины*. 2014. № 8(55). С. 36-39.

4. Сергеев В. В., Копач П. І. Основні шляхи досягнення цілей сталого розвитку гірничо-металургійних регіонів. *Екологія та природокористування*. 2013. Вип. 16. С. 167-180.
5. Вороніна Р. М. Логістика рециклінгу. *Вісник Національного університету «Львівська Політехніка»*. Львів, 2008. № 623. С. 28-33.
6. Зарічанська Є. В. Статистичний аспект поводження з відходами: реалії та перспективи. *Донбас 2020: перспективи розвитку очима молодих вчених: матеріали V наук.-практ. конф. у рамках програми «2010 рік – рік регіональних інновацій»* (Донецьк, 25-27 трав. 2010р.). Донецьк, 2010. С. 720-724.
7. Кочешкова І. М., Трушкіна Н. В. Організаційно-економічний механізм управління рециклінгом відходів. *Вісник Миколаївського національного університету ім. В. О. Сухомлинського*. Миколаїв, 2018. Вип. 22. С. 669-672.
8. Носков В. А., Макогон В. Ф. Состояние и перспективы утилизации железосодержащих отходов в металлургическом производстве Украины. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2001. № 4. С. 98.
9. Авраменко С. Х., Волох Ю. В. Екологічні проблеми від накопичення твердих промислових відходів та шляхи використання металургійних шлаків. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2010. № 35. С. 200-206.
10. Гельманова З. Ф., Жаксыбаев Д. М. Особенности образования и использования вторичных ресурсов в металлургическом производстве. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2016. № 6. С. 749-753.
11. Губіна В. Г., Горлицький Б. О. Проблема залізовмісних відходів гірничо-металургійного комплексу України – системний підхід. *Екологічний вісник*. 2008. № 3. С. 79-92.
12. Гусева Ю. О., Сычова Т. С., Моторина О. С. Формирование шлаков металлургического передела и основные направления их применения *Теория и технология металлургического производства*. 2013. № 1 (13). С. 59-62.
13. Лотош В. Е. Переработка отходов природопользования. Екатеринбург: «Полиграфист», 2007. 503 с.
14. Підлісна О. А., Філозоф В. М. Економічна ефективність використання вторинних відходів промисловості. *Економічний Вісник НТУУ «КПІ»: збірник наукових праць*. Київ, 2011. №. 8. С. 173-178.
15. Sereda V. P., Mukovska D. Ya. Research process of technological waste recycling in the conditions of the career of the metallurgical enterprises. *Математичне моделювання*. 2020. № 1(42). С. 93-98.
16. Щербаков В. П. Основы доменного производства. Владимир : Металлургия, 1969. С. 326.
17. Романов П. С., Романова И. П. Фундаментальные и прикладные исследования по приоритетным направлениям развития науки и техники. *Синергия*. 2016. № 2. С. 94-99.
18. Филоненко А. В. Анализ современных технологий переработки шлаков доменного производства. *Экология и промышленность*. 2018. № 3-4. С. 91-104.
19. Краюшкина В. А. Обзор металлургических вторичных материальных ресурсов и их применение. *Молодой ученый*. 2019. № 35 (273). С. 14-16.
20. Назюта Л. Ю., Смотров А. В., Губанова А. В. Структура образования и рециклінг технологических отходов на металлургических предприятиях полного цикла. *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. 2011. № 4. С. 44-54.
21. Евдокимов Е. В., Дедов А. С. Особенности утилизации и переработки шлака. *«Поколение будущего: взгляд молодых ученых–2018»*. 2018. С. 27-30.
22. Котов Ю. Т., Разкевич Ф. С., Гончарова К. В. Аналіз утворення відходів металургійного виробництва і розробка методів їх повторного використання на ПАТ «Арселорміттал Кривий Ріг». *Гірничий вісник Криворізького національного університету*. 2012. № 95 (1). С. 232-236.
23. Sereda V. P., Mukovska D. Ya. Analysis of metallurgical enterprises functioning career. *Математичне моделювання*. 2020. № 3(42). С. 118-123.

References

1. Valuev D. V., Gizatulin P. A. Tekhnologii pererabotki metallurgicheskikh otkhodov. Tomsk: TPU, 2012. 196 p.

2. Kopach P. I., Chilyi D. I. Analiz protsesiv vidkhodoutvorenniya na vyrobnytstvakh girnycho-metalurgiynogo kompleksu. *Ekologiya ta pryrodokorystuvannya*. 2012. vol. 15. pp. 118-132.
3. Demidik V. N. Ustoychivoe razvitiei retsikling otkhdov v chernoy metallurgii razvitie i retsikling otkhdov v chernoy metallurgii. *Metall i lit'e Ukrainy*. 2014. no. 8(55). pp. 36-39.
4. Sergeev V. V., Kopach P. I. Osnovni shlyakhy dosyagnennya tsiley stalogo rozvytku girnycho-metalurgiynykh regioniv. *Ekologiya ta pryrodokorystuvannya*. 2013. vol. 16. pp. 167-180.
5. Voronina R. M. Logistika retsyklingu. *Visnyk Natsional'nogo universytetu «L'viv's'ka Politekhnika»*. L'viv, 2008. no. 623. pp. 28-33.
6. Zarichans'ka E. V. Stasystychnyy aspekt povodzhennya z vidkhdamy: realiy ta perzpektyty. *Donbas 2020: perspektyvy rozvyku ochyma molodykh: materialy V nauk.-prakt. konf. u ramkakh programy «2010 rik – rik regional'nykh innovatsiy» (Donets'k, 25-27.05.2010 r.)*. Donets'k, 2010. pp. 720-724.
7. Kocheshkova I. M., Trushkina N. V. Organizatsiyno-ekonomichny mekhanizm upravlinnya rezyklingom vidkhdiv. *Visnyk Mykolayvs'kogo natsional'nogo universytetu im. V. O. Sukhmlyns'kogo*. Mykolayv, 2018. vol. 22. pp. 669-672.
8. Noskov V. A., Makogon V. F. Sostoyanie i perspektivy utilizatsii zhelezosoderzhashchikh otkhdov v metallurgicheskoy proizvodstve Ukrainy. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 2001. no. 4. p. 98.
9. Avramenko S. Kh, Volokh Yu. V. Ekologichni problemy vid nakopychennya tverdykh promyslovykh vidkhdov ta shlyakhy vykoristannya metalyrgiynykh shlakiv. *Zbirnyk naukovykh prats' Natsional'nogo girnychogo universytetu*. 2010. no. 35. pp. 200-206.
10. Gel'manova Z. F., Zhakysbaev D. M. Osobennosti obrazovaniya i ispol'zovaniya vtorichnykh resursov v mtallurgicheskoy proizvodstve. *Mezhdunarodny zhurnal prikladnykh i fyndamental'nykh issledovaniy*. 2016. no. 6. pp. 749-753.
11. Gubina V. G., Gorlyts'ky B. O. Problema zalizovmisnykh vidkhdov girnycho-metalurgiynogo kompleksu Ukrainy – systemny pidkhdid. *Ekologichny visnyk*. 2008. no. 3. pp. 79-92.
12. Guseva Yu. O., Sycheva T. S., Motorina O. S. Formirovanie shlakov metallutgicheskogo peredela i osnovnye napravleniya ikh primeneniya. Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva. 2013. no. 1 (13). pp. 59-62.
13. Lotosh V. E. Pererabotka otkhdov prirodonol'zovaniya. Ekaterenbург: «Полиграфист», 2007. 503 p.
14. Pidlisna O. A., Filozof V. M. Ekonomichna efektyvnist' vykorystannya btorynnykh vidkhdov promyslovosti. *Ekonomichny visnyk NTUU «KPI»: Zbirnyk naukovykh prats'*. Kyiv, 2011. no. 8. pp. 173-178.
15. Sereda B. P., Mukovska D. Ya. Research process of technological waste recycling in the conditions of the career of the metallurgical enterprises. *Matematychny modelyuvannya*. 2020. no. 1(42). pp. 93-98.
16. Shcherbakov V. P. Osnovy domennogo proizvodstva. Vladimir : Metallurgiya, 1969. p. 326.
17. Romanov P. S., Romanova I. P. Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya po prioritetnym napravleniyam razvitiya nauki i tekhniki. *Sinerhiya*. 2016. no. 2. pp. 94-99.
18. Filonenko A. V. Analiz sovremennykh tekhnologiy pererabotki shlakov domennogo proizvodstva. *Ekologiya i promyslennost'*. 2018. no. 3-4. pp. 91-104.
19. Krayushkina V. A. Obzor metallurgicheskikh vtorichnykh material'nykh resursov i ikh primeneniye. *Molodoy ucheny*. 2019. no. 35 (273). pp. 14-16.
20. Nazyuta L. Yu., Smotrov A. V., Gubanov A. V. Struktura obrazovaniya i retsikling tekhnologicheskikh otkhdov na metallurgicheskikh predpriyatiyakh polnogo tsikla. *Energotekhnologii i resersoberezhenie*. 2011. no. 4. pp. 44-54.
21. Evdokimov E. V., Dedov A. S. Osobennosti utilizatsii i pererabotki shlaka. «*Pokolenie budushchego: vglyad molodykh uchenykh-2018*». 2018. pp. 27-30.
22. Kotov Yu. T., Razkevich F. S., Goncharova K. V. Analiz utvorenniya vidkhdov metalurgiynogo vyrobnytstva i rozrobka metodiv ikh povtornogo vykorystannya na PAT «Arselormittal Kryvyi Rig». *Girnychy Visnyk Kryvoriz'kogo natsional'nogo universytetu*. 2012. no. 95 (1). pp. 232-236.

23. Sereda B. P., Mukovska D. Ya. Analysis of metallurgical enterprises functioning career. *Matematychni modlyuvannya*. 2020. no. 3(42). pp. 118-123.

Sereda Borys, department head, doctor of technical sciences, Dniprovsk state technical university.

Mukovs'ka Darya, postgraduate, Dniprovsk state technical university.

MAIN ASPECTS OF WASTE RECYCLING FOR METALLURGICAL FACILITIES ON THE EXAMPLE OF INDUSTRY OF SOUTHERN UKRAINE

To date, the activities of metallurgical enterprises are accompanied by a large amount of iron-containing waste, much of which is still not used, stored in dumps, storages, settling tanks. Therefore, in recent years there is a growing need for their comprehensive disposal. Such wastes include metallurgical slags. Slag is formed in the process of steel smelting. Slag accounts for a significant part of metallurgical waste. Slag dumps are man-made deposits of a mixture of metal and oxide components, each of which is a valuable raw material. Slag dumps and dumps occupy large areas and have a negative impact on the environment. The main way to reduce the damage from metallurgical slag to the environment is to recycle it. Processing and utilization of slag allows to solve one of the most important ecological tasks - cleaning of territories from large-tonnage wastes, which are slags of metallurgical production. The plants are interested in organizing the process of slag processing not only for environmental but also for economic reasons. According to research, the metal content in the slag reaches 15%. Given the shortage of iron ore for many metallurgical enterprises, namely, the south of Ukraine, the use of waste of own production in the technological cycle is largely the main and appropriate reserve to reduce production costs and increase economic performance of metallurgical production. This article analyzes the main aspects of recycling of metallurgical enterprises, considers the operation of the slag processing plant of the metallurgical enterprise of southern Ukraine. The production functions, structure, capacity of the shop are described. The volume, structure, main production indicators of the slag processing plant for 12 consecutive months are analyzed. The main types and volumes of processed technological waste are given. The expediency of their use in own production is shown.

Стаття надійшла: 15.10.2020 р.

UDC 669.056.9:621.793.6]:536-047.44

DOI <https://doi.org/10.26661/2071-3789-2020-1-06>

Sereda Borys, head of the department, doctor of technical sciences, Dniprovsk state technical university. Kamianske. ORCID: 0000-0002-9518-381X

Khina Borys, chief researcher, doctor of physical and mathematical sciences, physico-technical institute, NAS of Belarus republic. Minsk. ORCID: 0000-0002-5179-0941

Kruglyak Irina, associate professor, candidate of technical sciences, Dniprovsk state technical university. Kamianske. ORCID: 0000-0001-8872-6778

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF THE GAS MEDIUM IN THE FORMATION OF DIFFUSION COATINGS USING COMPOSITE SATURATING CHARGES

Review of the main processes of formation of diffuse coatings doped with molybdenum, vanadium and tungsten. The basic features of the formation of diffusion layers during chemical-thermal treatment are considered.: When the SHS is tested, the container is heated to temperatures of 1173-1330 K. Within 1-2 hours, a diffusion coating is formed due to the saturation of the surface of structural materials with atoms of saturating elements - Cr, Al, V, Ti, B, W, Mo. As saturating elements, the defects of these elements and the chemical compounds of these elements were used, and to determine the possibility of using specific substances, chemical reactions were considered that can occur in the temperature range of diffusion saturation using SOS. It should be noted that the metallothermal Reduced oxide, which is used in the synthesis of powder media for CHT, is very fast. When obtaining diffuse layers using the composition of saturating the medium, a gas phase is formed, containing spolo-I, I₂, I₃, H, H₂, H₃, Cl₂, Cl₃ with chemical elements. With an increase in temperature, an increase in the amount of halides is observed. This confirms the possibility of transferring alloying elements for the formation of diffusion coatings. Also, the amount of products in the gaseous phase increases and condensed products are released. It is characteristic that in the temperature range of 700-1500 K, the decomposition of reaction products occurs during CHT, which is confirmed by the production of decomposition substances and a sharp increase in the number of gas moles.

Key words: diffusion, composite saturating media, thermo-dynamics, coatings, phase

Chemical heat treatment (CHT) of metals and alloys, consisting in saturation with various elements (metals or non-metals) from the external environment in order to change the chemical and phase composition, structure and properties of the surface layers of the product, is a high-temperature process that has a complex multistage nature [1]. It is based on such complex physicochemical phenomena as heterogeneous chemical reactions and phase transformations, heat transfer, micro- and macroscopic mass transfer, which occur in solid, liquid and gaseous media (both in a saturating medium and in a growing solid coating).

The formation of a diffusion layer during CHT has the following characteristic features:

- 1) the final product formed on the surface of the saturable product (solid solution with an increased content of the saturating element or refractory compounds - carbides, nitrides, intermetalides, silicides etc.) is in a solid state in a wide range of process temperatures;
- 2) the initial or intermediate substances can be in a solid, liquid and gaseous state and undergo phase transitions;
- 3) heat and mass transfer in different phases have a significant effect on the kinetics and mechanism of heterogeneous reactions;
- 4) joint heat and mass transfer and heterogeneous reactions directly affect the structure and composition of the resulting product and, ultimately, the properties of the surface layers of the product;
- 5) these phenomena are manifested in different ways in various specific systems and technological processes of CHT.

Classification of CHT processes according to saturation methods, the nature of the saturating element, etc. is given in the literature [2-5]. According to the modes of implementation, various methods of chemotherapy can be conditionally divided into two groups:

a) traditional slow-flowing (furnace) processes;

b) intensive (fast-flowing) processes based on the use of fast heating, for example, high-frequency currents (HFC) or SHS processes, which, along with fast heat release and high temperature, are characterized by a short completion time of chemical reactions and phase transformations in a saturating mixture.

For the processes of metallothermal processes [6,7] an important characteristic is the adiabatic combustion temperature T_{ad} and the equilibrium composition of the reacting system at T_{ad} . Usually thermodynamic calculation of the quantity T_{ad} is based on a simple assumption [8]: the reaction proceeds completely (with a conversion of 100%) under adiabatic conditions; heat of reaction at initial temperature T_0 ($T_0 \geq 298$ K) spent on warming up to T_{ad} and possible melting of products. The quantity T_{ad} is determined from the enthalpy balance condition $\Delta H_{T_0}(r) = \Delta H_{T_{ad}}(pr)$:

$$\begin{aligned} \Delta H_{T_0}(r) &= \sum_r \left[\Delta H_{298}^0(r) + \int_{298}^{T_0} c_p(r) dT \right] = \Delta H_{T_{ad}}(pr) = \\ &= \sum_{pr} [\Delta H_{298}^0(pr) + (1-x_m) \int_{298}^{T_{ad}} c_p(pr_s) dT + \\ &+ x_m (\int_{298}^{T_m} c_p(pr_m) dT + \Delta H_m(pr_m) + \int_{T_m}^{T_{ad}} c_p(pr_m) dT)], \end{aligned} \quad (1)$$

where ΔH_{298}^0 – the standard enthalpy of formation of a substance; ΔH_m and T_m – heat and melting temperature; c_p – heat capacity; x_m – molar fraction of the melt in the reaction products; r means reagents, and pr – reaction products; subscripts s and m refer to solids (solid) and melt (melt), respectively.

Formula (1) was used to calculate the value of T_{ad} in a large number of metallothermal systems in the course of one reaction [8–10].

When vanadium using a composite saturating medium, a gas phase is formed, which contains compounds H , H_2 , OH , Cl , Cl_2 , Cl_3 , Cl_6 , $2Cl$ with chemical elements (Fig. 1).

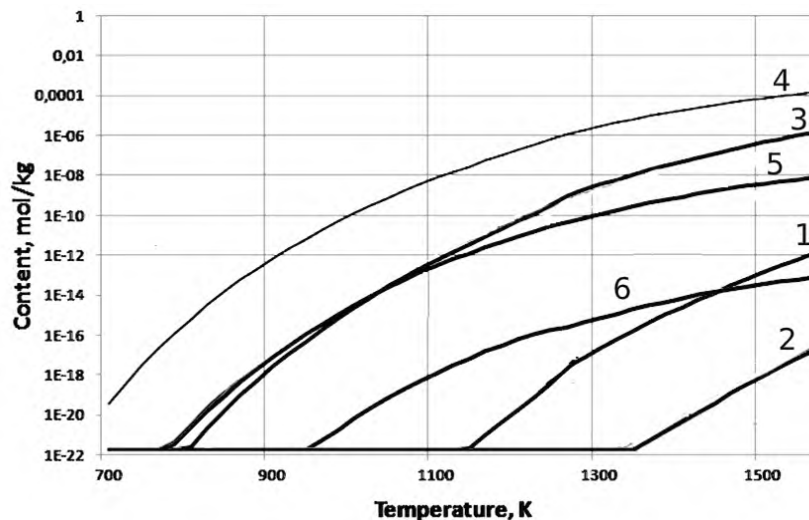


Figure 1 – The content of the gaseous vanadium compound in a container with a composite saturating medium for the system: 18% EC + 22% V + 55% Al_2O_3 + 3% NH_4Cl + 2% NH_4I :

1 - V, 2 - VO, 3 - VCl, 4 - VCl₂, 5 - VCl₃, 6 - VCl₄

Gaseous products interacting with elements of the powder system (V, Cr) go into the gas phase (appear AlH , AlH_2 , $AlOH$, $AlCl_2$, $AlCl_3$, Al_2Cl_6 , $AlHCl$, AlH_2Cl , $AlOHCl_2$, CrO , CrH , $CrOH$, $CrCl$, $CrCl_2$, $CrCl_3$, $CrOCl$, $CrOCl_2$, VO , VCl , VCl_2 , VCl_3 , VCl_4).

When molybdenum is used with a composite saturating medium, a gas phase is formed that contains compounds H , H_2 , H_3 , Cl , Cl_2 , Cl_3 , Cl_6 , I , I_2 , I_3 with chemical elements (Fig. 2).

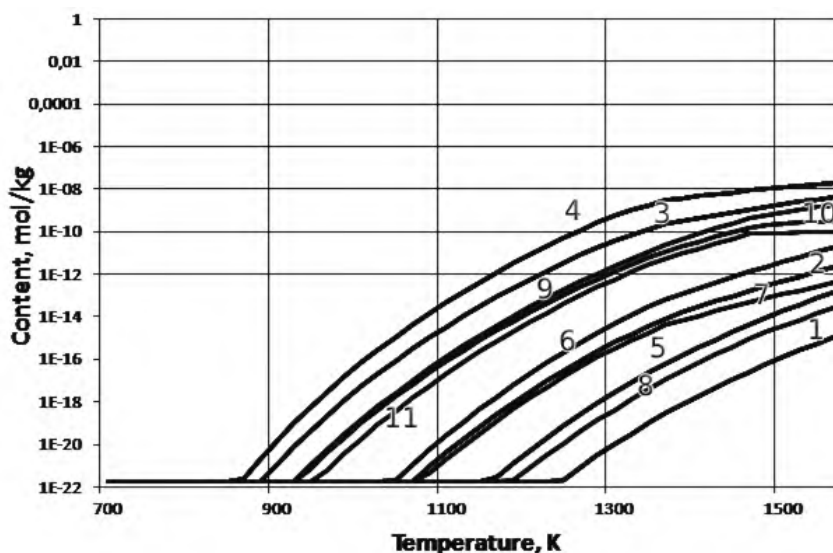


Figure 2 — Content of a gaseous molybdenum compound in a container with a composite saturating medium for the system: 16% EC + 32% $FeMo$ + 46% Al_2O_3 + 2% I_2 + 4% NH_4Cl :
 1 - $MoCl$, 2 - $MoCl_2$, 3 - $MoCl_3$, 4 - $MoCl_4$, 5 - $MoOCl$, 6 - $MoOCl_2$, 7 - $MoOCl_3$,
 8 - MoI , 9 - MoI_2 , 10 - MoI_3 , 11 - MoI_4

Gaseous products interacting with elements of the powder system (Al , Mo , Cr) and transferred to the gas phase (appear CrH , $CrOH$, $CrCl$, $CrCl_2$, $CrCl_3$, $CrOH$, $CrOCl_2$, CrI , CrI_2 , CrI_3 , $MoCl$, $MoCl_2$, $MoCl_3$, $MoCl_4$, $MoOCl$, $MoOCl_2$, MoI , MoI_2 , MoI_3 , MoI_4).

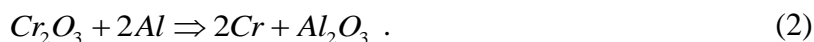
When tungstening using a composite saturating medium, a gas phase is formed that contains compounds F , F_2 , F_3 , F_4 , F_6 , I , I_2 , I_3 , I_4 with chemical elements. With increasing temperature, an increase in the amount of halides is observed (Fig. 3).

Gaseous products interacting with elements of the powder system (Al , W , Cr) and transferred to the gas phase (appear AlF , AlF_2 , AlF_3 , Al_2F_6 , $AlOF$, $AlOF_2$, AlI , AlI_2 , AlI_3 , CrF , CrF_2 , CrF_3 , CrF_4 , $CrOF$, CrO_2F , $CrOF_2$, CrO_2F_2 , CrI , CrI_2 , CrI_3 , WF_2 , WF_3 , WF_4 , WOF , WO_2F , WOF_2 , WOF_3 , WI_2 , WI_3 , WI_4).

At temperatures of 700 K, part of the condensed phase practically does not change. This fact allows us to assume that in the temperature range of 700...1600 K, a reaction occurs with the release of a condensed phase, but without a change in the number of moles, which is typical for decomposition reactions, exchange of material, that is, in fact, chemical transport of elements takes place [11]. In the temperature range of 700...1600 K there are: condensed compounds: $Al_2O_3(c)$, $AlF_3(c)$, $Cr_2O_3(c)$, $W(c)$, $WO_2(c)$, $Al_2O_3(c)$, $AlN(c)$, $Fe(c)$, $Cr(c)$, $CrCl_2(c)$, $CrI_2(c)$, $Mo(c)$, $Cr_2N(c)$, $Al(c)$, $Al_2O_3(c)$, $AlN(c)$, $V(c)$.

As a result of the thermodynamic calculation of the equilibrium composition of the reaction products, we can propose the following kinetic scheme of chemical transformations in the studied systems. The following are examples of the chemical reactions in vanadium:

1. Exothermic reaction (ER):



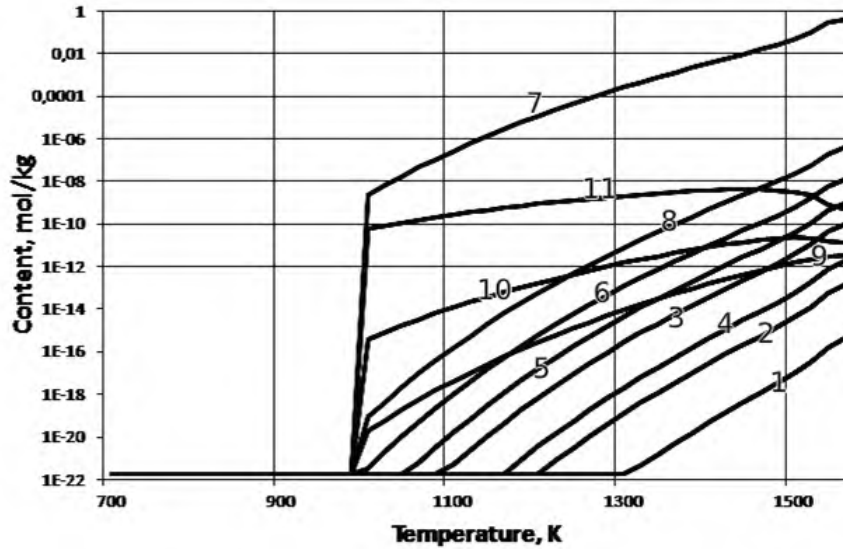
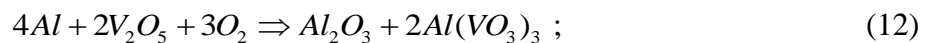
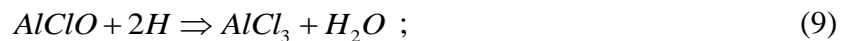
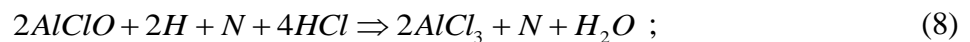


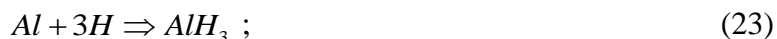
Figure 3 – The content of a gaseous tungsten compound in a container with a composite saturating medium for the system: 20% EC + 35% WO_3 + 39% Al_2O_3 + 2% I_2 + 4% AlF_3 :

2. Decay reaction of a gas transport agent:

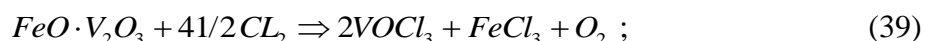
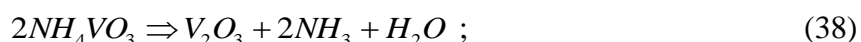
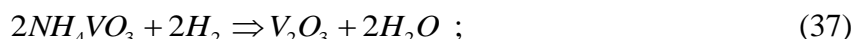
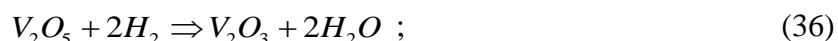
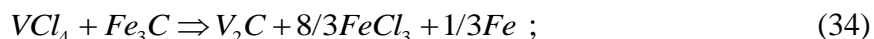
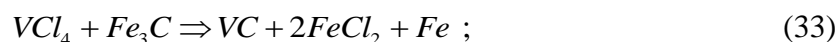
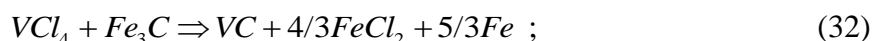
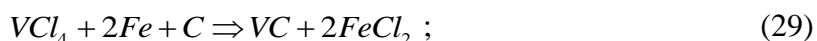
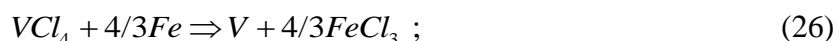


3. Chemical transport reaction:





4. Exchange reactions with structural material:



Approbation and conclusions. Calculations are carried out and their analysis allows obtaining information about the mechanism of obtaining diffusion coatings using composite saturating media, and the use of software analysis - to perform an objective assessment of the composition of powder composite mixtures to regulate this process.

References

1. Voroshnin L.G. Multicomponent diffusion carbide coatings on iron-carbon alloys. – Minsk : BNTU, 2007. 470 p.
2. Minkevich A. N. Chemical-thermal treatment of metals and alloys. Moscow. : Mechanical Engineering, 1965. 492 p.

3. Borisenok L. A., Vasiliev L. G. Voroshnin L. G. Chemical-heat treatment of metals and alloys: Reference book. Moscow : Metallurgy, 1981. 424 p.
4. Lakhtin Yu. M., Arzamasov B. N. Chemical-thermal treatment of metals, Moscow : Metallurgy, 1985. 256 p.
5. Dubinin G. N. Diffusion chromium plating of alloys. Moscow : Metallurgy, 1964. 452 p.
6. Merzhanov A. G. Self-propagating high-temperature synthesis. Physical chemistry: modern problems. Moscow : Chemistry, 1983. P. 6-45.
7. Merzhanov A. G. Scientific foundations, achievements and prospects for the development of solid flame combustion processes *Bulletin of the Academy of Sciences. Chemical Science Series*. 1997. No. 1. P. 8-32.
8. Novikov N. P., Borovinskaya I. P., Merzhanov A. G. Thermodynamic analysis of reactions of self-propagating high-temperature synthesis. Problems of combustion in chemical technology and metallurgy. Chernogolovka: OIHF, 1975. pp. 174-188.
9. Bhaduri S. B. A thermodynamic assessment for synthesizing transition method silicides by the combustion synthesis process *Scripta Materialia*. 1992. Vol. 27. No 10. P. 1277-1281.
10. Singh M. Thermodynamic analysis for the combustion synthesis of SiC-B4C composites. *Scripta Materialia*. 1996. Vol. 34. No 6. P. 923-927.
11. Sereda B. P., Gaidaenko O. S., Sereda D. B. Thermodynamic modeling of titrated alloys doped with titanium under conditions of self-propagating high-temperature synthesis. *Mathcal modelling*. 2019. № 1 (40). Pp. 114-119.

References

1. Voroshnin L.G. Multicomponent diffusion carbide coatings on iron-carbon alloys. Minsk : BNTU, 2007. 470 p.
2. Minkevich A. N. Chemical-thermal treatment of metals and alloys. Moscow .: Mechanical Engineering, 1965. 492 p.
3. Borisenok L. A., Vasiliev L. G. Voroshnin L. G. Chemical-heat treatment of metals and alloys: Reference book. Moscow : Metallurgy, 1981. 424 p.
4. Lakhtin Yu. M., Arzamasov B. N. Chemical-thermal treatment of metals, Moscow : Metallurgy, 1985. 256 p.
5. Dubinin G. N. Diffusion chromium plating of alloys. Moscow : Metallurgy, 1964. 452 p.
6. Merzhanov A. G. Self-propagating high-temperature synthesis. Physical chemistry: modern problems. Moscow : Chemistry, 1983. pp. 6-45.
7. Merzhanov A. G. Scientific foundations, achievements and prospects for the development of solid flame combustion processes *Bulletin of the Academy of Sciences. Chemical Science Series*. 1997. no. 1. pp. 8-32.
8. Novikov N. P., Borovinskaya I. P., Merzhanov A. G. Thermodynamic analysis of reactions of self-propagating high-temperature synthesis. Problems of combustion in chemical technology and metallurgy. Chernogolovka: OIHF, 1975. pp. 174-188.
9. Bhaduri S. B. A thermodynamic assessment for synthesizing transition method silicides by the combustion synthesis process *Scripta Materialia*. 1992. vol. 27. no. 10. pp. 1277-1281.
10. Singh M. Thermodynamic analysis for the combustion synthesis of SiC-B4C composites. *Scripta Materialia*. 1996. vol. 34. no. 6. pp. 923-927.
11. Sereda B. P., Gaidaenko O. S., Sereda D. B. Thermodynamic modeling of titrated alloys doped with titanium under conditions of self-propagating high-temperature synthesis. *Mathematical modelling*. 2019. no. 1 (40). pp. 114-119.

Середа Борис Петрович, професор, доктор технічних наук, завідувач кафедри, Дніпровський державний технічний університет. Каменське.

Хіна Борис Борисович, головний науковий співробітник, доктор фізико-математичних наук, Фізико-технічний інститут НАН Білорусію Мінськ.

Кругляк Ирина Васильевна, кандидат технічних наук, доцент. Дніпровський державний технічний університет. Каменське.

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF THE GAS MEDIUM IN THE FORMATION OF DIFFUSION COATINGS USING COMPOSITE SATURATING CHARGES

Review of the main processes of formation of diffuse coatings doped with molybdenum, vanadium and tungsten. The basic features of the formation of diffusion layers during chemical-thermal treatment are considered.: When the SHS is tested, the container is heated to temperatures of 900-1100 °C. Within 1-2 hours, a diffusion coating is formed due to the saturation of the surface of structural materials with atoms of saturating elements - Cr, Al, V, Ti, B, W, Mo,. As saturating elements, the defects of these elements and the chemical compounds of these elements were used, and to determine the possibility of using specific substances, chemical reactions were considered that can occur in the temperature range of diffusion saturation using SOS. It should be noted that the metallothermal Reduced oxide, which is used in the synthesis of powder media for CHT, is very fast. When obtaining diffuse layers using the composition of saturating the medium, a gas phase is formed, containing spolo-I, I₂, I₃, H, H₂, H₃, Cl₂, Cl₃ with chemical elements. With an increase in temperature, an increase in the amount of halides is observed.

This confirms the possibility of transferring alloying elements for the formation of diffusion coatings. Also, the amount of products in the gaseous phase increases and condensed products are released. It is characteristic that in the temperature range of 700-1500 K, the decomposition of reaction products occurs during CHT, which is confirmed by the production of decomposition substances and a sharp increase in the number of gas moles.

Стаття надійшла: 15.10.2020 р.

UDC 620.22:66-122]:66.01

DOI <https://doi.org/10.26661/2071-3789-2020-1-07>

Sereda Borys, head of the Department, doctor of technical sciences, professor, Dniprovsk State Technical University, Kamyanske. ORCID: 0000-0002-9518-381X

Volokh Vitaliy, postgraduate, Dniprovsk State Technical University, Kamyanske

FORMATION OF LOW-CARBON WIRE ROD STRUCTURE UNDER SHS CONDITIONS USING MAGNETIC COERCIMETRIC CONTROL

The article discusses the use of a self-propagating high-temperature synthesis of SHS of solid chemical compounds – it is a new technological process that possible to obtain a material with a given structure based on carrying out an exothermic reaction of interaction of reagents in the combustion regime. The influence of cold deformation and intermediate annealing under SHS conditions on the structure, magnetic and mechanical properties of low-carbon steel is determined. The use of magnetic coercimetric control possible to control changes in the structure and mechanical properties of during technological cycle for low-carbon welded wire in production conditions.

Keywords: mechanical properties, cold deformation, anneal in SHS conditions, coercimetric force, special boundaries, size of grain

Introduction. Technical progress involves the introduction of new technologies for the manufacture of welding wire which is used not only for welding but also for surfacing. For the manufacture of welding wire requires a quality workpiece, it should not consist of segments and gaps and must comply with the requirements of regulatory documentation.

The state standard 2246-70 sets requirements for the chemical composition of wire 08G2S. Alloying elements such as vanadium V, tungsten W, aluminum Al, and a number of other alloyed wire 08G2C is usually not alloyed. It is permissible to have manganese in the amount of from 0.65 to 2.1%. If the usual wire is made, the copper content in it cannot be more than 0.25%. Standards allow a content of up to 0.01% nitrogen. This hardware is used not only for welding, but also for surfacing.

The essence of the SHS method is to carry out an exothermic reaction in the mode of propagation of the combustion wave with the formation of combustion products in the form of compounds and materials of practical value and having valuable characteristics.

This synthesis of materials differs significantly from standard methods of powder metallurgy, based on the sintering of chemically inert compounds and have a number of obvious advantages, among which are the following:

- formation of active chemical and thermal zones, which allows to intensify the transformation of reagents and leads to the formation of the necessary goods;
- the use of less expensive chemical energy (thermal separation in exothermic reactions) instead of electricity to achieve the high temperatures required in obtaining products;
- use of relatively simple equipment (instead of furnaces and other heating devices);
- the use in the process of rapid layer-by-layer heating of large volumes of reagents instead of slow heating through the walls from external heat sources.

From this point of view, SHS processes should find practical application in all cases where there are no restrictions related to raw materials or economic considerations [1,2].

The results of works in which at different cooling modes researches of structure and special borders in steels 09G2S, and 3ps [3,5] were carried out. But in these works magnetic properties and their influence on structure of low-carbon steels were not studied. In works [4,6] the eutectoid steel U8 is investigated. The author of work [7] found that with increasing austenitization temperature increases the number of special boundaries in the final structure, which leads to a decrease in the energy of the grain boundary complex. But this paper also did not study the effect

of coercive force, namely the magnitude of coercive force, on special low-energy boundaries. The results of these works formed the basis of their practical application in the study of the structure and properties of wire obtained in industrial conditions.

Materials and methods of control. The wire rod was examined diameter 7.0 mm produced by PJSC «ArcelorMittal Kryvyi Rih» of the following chemical composition (tbl. 1).

Table 1 – Chemical composition of wire rod

Carbon	Manganese	Silicon	Sulfur	Phosphor	Chromium	Nickel	Copper
0.06	0.70	0.25	0.025	0.30	0.30	0.30	0.30

The scheme of production drawing is as follows:

The initial blank diameter 7.0 mm was stretched through the caliber diameter 3.3 mm; then the wire diameter 3.3 mm was annealed in a furnace under SHS conditions at a temperature 1023 K for eight hours. After annealing under SHS conditions, this wire was stretched through a caliber of diameter 1.2 mm. Mechanical tensile tests of wire samples were performed in accordance with the state standard 1797 on a TTM-500 test machine.

Metallographic studies of the structure were performed on a microscope «Neophot-21» at a magnification of x50...500 and a scanning electron microscope «REM-106I.» In order to prevent blockage of the edges, in the manufacture of sections, the samples were clamped in steel clamps. After sanding on sandpaper, polishing was performed on diamond pastes with successive reduction of grain size to 0.1 μm . The final polishing was performed on the dress in the presence of an aqueous emulsion of chromium oxide. The wire was stretched on a TTM-500 bursting machine. Measurement of coercive force was performed with a semi-automatic coercimeter «KRM-C-K2M» in the middle of the wire.

Setting objectives. Show the influence of structure after cold deformation, annealing in SHS conditions - on mechanical properties, grain size, relative number of special limits and value of coercive force during wire drawing from low-alloy steel grade.

Results and discussion. It is established that the industrial drawing of wire rod caused a change in mechanical properties, grain size, coercive force, and after annealing under SHS conditions the relative number of special boundaries increased. The mechanical properties of steel were presented in table 2

Table 2 – Mechanical properties of wire rod and wire 08G2S

Wire diameter	σ_T , МПа	σ_B , МПа	Δ , %	Ψ , %
Diameter 7.0 mm	250	430	42.84	63.06
Diameter 3.3 mm (cold drawing)	673	765	9.64	30.79
Diameter 3.3mm (after annealing in the SHS conditions)	302	553	36.02	68.96
Diameter 1.2 mm	963.72	1042.6	3.95	25.62

The results of the study of the microstructure at the stages of wire production

The finely fibrous structure is the result of elongation and deformation of grains during metal extraction, which is confirmed by the high value of coercive force $H_c = 9.1$ A/sm is 10.06 μm . Figure 1.b is a result of the final plastic deformation by drawing significantly increased the strength properties of the wire. In the initial state of the wire diameter 7.0 mm, the value of the coercive force was $H_c = 5.71$ A/sm.

The magnetic properties are sensitive to cold plastic deformation. At cold deformation of a wire at the pass through a calibration of diameter 3.0 mm majestic coercive force increases and makes $H_c = 9.28$ A/sm. The density of grains increases, they are pulled along the direction of drawing [8].

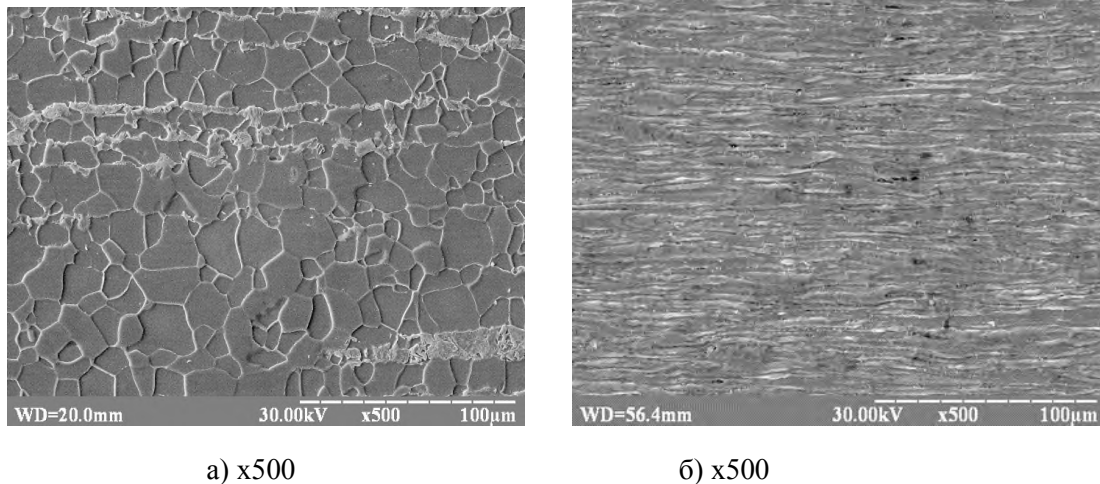


Figure 1 – Microstructure of low-alloy steel 08G2S workpiece-wire rod (a), (b) after processing under SHS conditions, end wire diameter 1.2 mm

The most dangerous tensile residual stresses, as they can cause damage to the product. Therefore, annealing was performed under SHS conditions to remove residual stresses [9,10].

The main changes in the magnetic and mechanical properties of low-carbon steels occur in the range of 773...73 K, this is due to the removal of internal stresses, changes in grain size by their orientation, which leads to a decrease in coercive force, hardness and tensile strength [9,10].

Histogram of the distribution of the magnitude of the coercive force from structural changes.

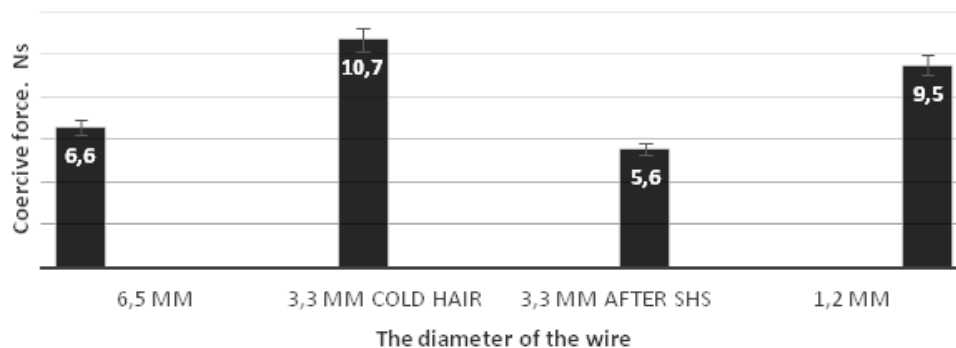


Figure 2 – Histogram of the distribution of the magnitude of the coercive force from the diameter and structure of the wire

After annealing under SHS conditions of the same wire, the value of the coercive force is $H_c = 6.76$ A/sm. There was a decrease in coercive force by $H_c = 27\%$. The most technological parameter on the temperature regime during wire drawing is determined.

Conclusions. The structure of the workpiece-wire rod is characterized by a grain size of $10.06 \mu\text{m}$. The relative number of special limits is 25.08%. It was found that after annealing the cold-deformed wire rod, the grain size in the wire decreased almost twice from $10.60 \mu\text{m}$ to $5.58 \mu\text{m}$, and the relative number of special boundaries increased from 25.06 % to 36.8 %. It is shown that after annealing in the SHS conditions the grain was crushed, the relative number of special limits increased to 35.1 %, the magnetic permeability increased, which led to a decrease in the value of the coercive force by 39.5 %. The magnitude of the coercive force NS allows you to control changes in the structure of the wire at all stages of its production.

References

1. Середя Б. П., Кругляк И. В., Жеребцов А. А., Белоконь Ю. А. Обработка металлов давлением в нестационарных температурных условиях. Монография. Запорожье : ЗГИА, 2009. 252 с.
2. Ткаченко С. Н. Поверхностное упрочнение углеродсодержащих материалов в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза: дисс. канд. техн. наук: 05.02.01. Днепропетровск. 2015. 142 с.
3. Середя Б. П., Волох В. И. Формирование структуры крюков погрузки подъемников в условиях СВС. *Передовые технологии и устройства*. Сборник научных трудов. Луцк. ЛТУ, 2020. Вып. 16. С. 123-129.
4. Середя Б. П., Середя Д. Б., Волох В. И. Моделирование теплового процесса для низкоуглеродистой стали в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. *Математичне моделювання*. 2020. № 1 (42). С. 72-77.
5. Большаков В. И., Сухомлин В. И., Волох В. И. Специальные границы в обезуглероженном слое строительной стали. *Строительство, материаловедение, машиностроение*: Сб. научных работ. Днепропетровск : ПГАСиА, 203. Вып. 67. С. 373-377.
6. Большаков В. И., Сухомлин В. И., Волох В. И. Влияние дисперсности перлита на магнитные свойства эвтектической стали. *Строительство, материаловедение, машиностроение*: Сб. научных работ. Днепропетровск : ПГАСиА, 203. Вып. 67. С. 273-278.
7. Сухомлин Г. Д. Специальные границы в феррите низкоуглеродистой стали. *Металлофизика и новейшие технологии*. 2013. Т. 35. № 9. С. 1237-1249.
8. Середя Б. П. *Металлургия и термическая обработка черных и цветных металлов*: учебник. Запорожье : ЗДІА, 2008. 302 с.
9. Середя Б. П. *Обработка металлов давлением*: учебник. Запорожье: ЗГИА, 2009. 343 с.
10. Середя Б. П. Поверхностное упрочнение материалов, работающих в условиях сложного воздействия агрессивных сред: монография. Камянское. ДГТУ, 2019. 172 с.

References

1. Sereda B. P., Kruglyak I. V., Zherebtsov A. A., Belokon Yu. A. Obrabotka metallov davleniem v nestatsionarnykh temperaturnykh usloviyakh. Monografiya. Zaporozh'e : ZGIA, 2009. 252 p.
2. Tkachenko S. N. Poverkhnostnoe uprochnenie uglerodsoderzhshchikh materialov v usloviyakh samorasprostranyayushchtgovysokotemperaturnogo sinteza: dis. kand. tekhn. nauk: 05.02.01. Dnepropetrovsk. 2015. 142 p.
3. Sereda B. P., Volokh V. I. Formirovanie struktuty kryukov pogruzki pod'emnikov v usloviyakh SHS. *Peredovye tekhnologii i ustroystva*. Sbornik nauchnykh trudov. Lutsk. LTU, 2020. vol. 16. pp. 123-129.
4. Sereda B. P., Sereda D. B., Volokh V. I. Modelirovanie teplovogo protsessa dlya nizkouglerodisty srali v usloviyakh samorasprostranyayushchegosya vysokotemperaturnogo sinteza. *Marematychnye modelyuvannya*. 2020. no. 1 (42). pp. 72-77.
5. Bov'shkov V. I., Sukhmlin V. I., Volokh V. I. Spetsial'nye granity v obzuglerozhenom sloe stroitel'noy stali. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie* Sbornik nauchnykh rabot. Dnepropetrovsk : PGASiA, 2003. vol. 67. pp. 373-377.
6. Bov'shkov V. I., Sukhmlin V. I., Volokh V. I. Vliyanie dispersnosti perlita na magnitnye svoystva evtekticheskoy stali. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie* Sbornik nauchnykh rabot. Dnepropetrovsk : PGASiA, 2003. vol. 67. pp. 273-278.
7. Sukhomlin G. D. Spetsialnye granitsy v ferrite nizkouglerodisty stali. *Metallofizika i noveyshie tekhnologii*. 2013. t. 35. no. 9. pp. 1237-1249.
8. Sereda B. P. *Metallurgiya i termicheskaya obrabotka cherykh i tsvetnykh metallov*: uchebnik. Zaporizhzhya : ZDIA, 2008. 302 p.
9. Sereda B. P. *Obrabotka metallov davleniem*: Uchebnik. Zaporozhe: ZGIA, 2009. 343 p.
10. Sereda B. P. Poverkhnostnoe uprochnenie materialov, robotayushchikh v usloviyakh slozhnogo bozdeystviya agressivnykh sred: monografiya. Kam'yans'ke. DGTU. 2019. 172 p.

Середа Борис Петрович, завідувач кафедри, доктор технічних наук, професор, Дніпровський державний технічний університет, Кам'янське.

Волох Віталій Іванович, аспірант, Дніпровський державний технічний університет, Кам'янське.

FORMATION OF LOW-CARBON WIRE ROD STRUCTURE UNDER SHS CONDITIONS USING MAGNETIC COERCIMETRIC CONTROL

Formation of the structure of low-carbon wire rod in SHS conditions using magnetic coercimetric control. The article discusses the use of a self-propagating high-temperature synthesis of SHS of solid chemical compounds - this is a new technological process that makes it possible to obtain a material with a given structure based on carrying out an exothermic reaction of interaction of reagents in the form of combustion. The advantages of using SHS are low energy consumption, small-sized equipment is needed, and at the same time there is a high productivity and environmental safety of the SHS process. Introduction of a new technological process for the production of welding wire into production. In the process of its production, the initial billet is successively subjected to cold deformation and annealing under SHS conditions, while changes occur in its structure that affect a number of mechanical and physical properties of the material. The methods of scanning microscopy were used to analyze the microstructure of the welding wire, and measurements of the magnetic properties of the structures were carried out at various stages of the production of the welding wire. The influence of cold deformation and intermediate annealing under SHS conditions on the structure, magnetic and mechanical properties of low-carbon steel is determined. The dependence of the mechanical properties, coercive force, grain size and the number of special boundaries on the modes of cold deformation and annealing under SHS conditions has been established. In the original workpiece, the relative number of special boundaries is 24.05%, and after annealing, the relative number of special boundaries is already 39.5%. The use of a control tool, namely the magnitude of the coercive force N_c , makes it possible to control changes in the structure and mechanical properties of the workpiece throughout the entire technological cycle of manufacturing low-carbon welded wire in production conditions. The most technological process in terms of temperature conditions during wire drawing has been determined.

Стаття надійшла: 15.10.2020 р.

УДК 669.018:536]:66.091.3

DOI <https://doi.org/10.26661/2071-3789-2020-1-08>

Скідін Ігор Едуардович, старший викладач, Криворізький національний університет ORCID: 0000-0003-3247-473X

Воденнікова Оксана Сергіївна, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет. ORCID: 0000-0003-0496-5435

Воденніков Сергій Анатолійович, професор, доктор технічних наук, Національний університет «Запорізька політехніка». ORCID: 0000-0002-5563-5244

Сайтгарєєв Леван Наїльєвич, доцент, кандидат технічних наук, Криворізький національний університет. ORCID: 0000-0002-6841-3202

Бабошко Дмитро Юрійович, старший викладач, кандидат технічних наук, Криворізький національний університет. ORCID: 0000-0003-2332-4721

ПРО РОЗРАХУНКИ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ШАРУ ТЕРМІТНОГО СПЛАВУ НА СТАЛЕВІЙ ПІДКЛАДЦІ ЗА СВС-ПРОЦЕСОМ

Розглянуто процес формування шару термітного сплаву на основі системи Fe-Cr-C на сталевій підкладці за допомогою самопоширюваного високотемпературного синтезу. Показано, що попереднє нагрівання шихтових компонентів термітної суміші призводить до збільшення спікливості продукту, знижує продуктивність і здорожує процес синтезу кінцевих СВС-продуктів. В процесі нагрівання термітної суміші з 273 К до 873 К утворюється 67,1% додаткового заліза та 24,5% карбіду хрому, що вводиться від кількості компонентів термітної суміші. При цьому на нагрівання порошку заліза витрачається 2318,44 кДж теплоти, а на нагрівання порошку хрому 3314,93 кДж теплоти (у перерахунку на 1,0 кг суміші). Оптимальний вміст металевого наповнювача у нагрітій до 873 К термітній суміші складає 40%. Показано, що надлишок теплоти, який утворився в процесі алюмотермічних реакцій, можна витратити на розплавлення додаткової кількості порошку заліза.

Ключові слова: біметалеві виливки, самопоширюваний високотемпературний синтез, термітний сплав, структуроутворення

Постановка проблеми та її зв'язок з науковими чи практичними завданнями. На сьогодні передумовою одержання нових матеріалів з оптимальними техніко-економічними показниками є розробка технології, заснованої на розумінні та прогнозуванні процесів структуроутворення й формуванні потрібних фізико-механічними та експлуатаційними властивостями виробів з них.

Під час виробництва біметалевих виливків важливим залишається питання впливу різних видів модифікаторів на їх функціональні властивості. Зокрема, використання сумішей ультра- та нанодисперсних порошоків різного хімічного складу призводить до підвищення ефективності дії модифікаторів на процес структуроутворення та механічні властивості одержаних біметалевих виливків.

Однією з ефективних технологій одержання біметалевих виливків є застосування самопоширюваного високотемпературного синтезу, суть якого полягає в проходженні прямого синтезу цінних в практичному відношенні сполук в екзотермічних реакціях між певними хімічними елементами [1-4]. Особливу увагу під час СВС процесу приділяють механізму формування структури та утворення продуктів у самопоширюваних термітних реакціях [5-7]. Для одержання щільного СВС-матеріалу з високими фізико-механічними характеристиками необхідно враховувати закономірності горіння реакційної суміші, формування хімічного і фазового складу кінцевого продукту та режим кристалізації сплаву [8].

Вище зазначене спричинює виконання розрахунків процесу формування шару термітного сплаву на сталевій підкладці за СВС-процесом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні технології із застосуванням самопоширюваного високотемпературного синтезу відрізняються між собою типом хімічних реакцій і процесів, зовнішнім впливом, видом вихідної сировини, структурою шихти, морфологією продуктів і способів їх обробки чи переробки та призначення кінцевої продукції [9].

Серед одних з найбільш використовуваних напрямків реалізації СВС-процесу є нанесення зносостійких захисних покриттів [9-13].

Одержанню на вуглецевих матеріалах захисних хромоалюмотитанових і хромоалюмосіліційованих покриттів в умовах СВС-процесу присвячено роботу [14].

Авторами роботи [15] розглянуто технологію одержання інтерметалідів титанових сплавів на основі самопоширювального високотемпературного синтезу та показано, що розроблені склади СВС-сумішей та технологічні режими СВС-процесу дозволяють створювати інтерметалідні сплави на основі алюмінідів титану.

Дослідженню технології одержання біметалевих виливків методом СВС-процесу присвячено роботи [16, 17].

В роботі [18] розглянуто напрями застосування самопоширювального високотемпературного синтезу та комбінованих (СВС+металотермія) процесів для синтезу литих сплавів – легуваних конструкційних і нержавіючих сталей, легуваних зносостійких чавунів, твердих сплавів і карбідосталей. Застосування СВС-процесу у комплексі із лазерним поверхневим зміцненням дає змогу вирішити проблему наплавлення високотвердих зміцнених шарів на поверхню сплаву [18, 19].

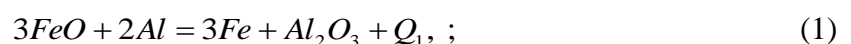
Застосування самопоширювального високотемпературного синтезу знайшло відображення також в технологічному процесі виготовлення пористих проникних матеріалів [20]. Можливість застосування СВС-процесу сумісно з газотермічним напиленням розглядають у роботі [21].

Постановка завдання. Мета роботи – визначити вплив нагрівання компонентів шихти на процес формування шару термітного сплаву на сталевій підкладці за СВС-процесом.

Викладення матеріалів та результати. за лабораторних умов розглядали процес формування шару термітного сплаву на основі системи $Fe-Cr-C$ на сталевій підкладці за допомогою самопоширюваного високотемпературного синтезу. Як компоненти шихти використовували сталеву окалину, порошок алюмінію марки ПА-2 (ГОСТ 6058-73), порошок заліза марки ПЖРВ 2.300.28 (ГОСТ 9849-86), порошок хрому марки ПХА (ГОСТ 14-00186482-051-2005) та модифікатор марки МК91А.

Для запобігання втрати заліза в термітному сплаві додавали різні модифікатори, які знижують температуру системи або додаткову кількість заліза в певному масовому співвідношенні, яке за рахунок надлишку теплоти розплавиться та перейде у сплав. Це, в свою чергу, дає змогу зміцнити формування шару термітного сплаву під час СВС-процесу та надати йому певні фізико-механічні властивості.

Слід зазначити, що у термітній суміші враховується наявність двох оксидів заліза FeO та Fe_2O_3 , алюмотермічні реакції відновлення яких мають вигляд:



Відомо, що попереднє нагрівання шихтових компонентів термітної суміші призводить до збільшення спікливості продукту, знижує продуктивність і здорожує процес синтезу кінцевих СВС-продуктів, але не знижує ймовірність утворення нестехіометричних сполук (продуктів алюмотермічних реакцій за СВС-процесом).

На нагрівання компонентів термітної суміші від стандартних умов (298 К) до температури її кипіння (3134 К) для порошку заліза та хрому витрачають відповідно 2318,44 кДж та 3314,93 кДж теплоти (у перерахунку на 1,0 кг суміші).

Якщо вважати, що всю наведену теплоту витрачають тільки на випаровування заліза, якого в продуктах реакції міститься 52,28 %, то в перерахунку на 1,0 кг заліза, з урахуванням нагрівання суміші до температури 473 К, кількість теплоти становить 1069,39 кДж/кг.

Отримані розрахункові данні сумарної кількості додаткового порошку заліза та карбіду хрому від кількості компонентів термітної суміші, що вводять у термітний сплав під час нагрівання до температури 873 К наведено у табл. 1 та на рис. 1.

Враховуючи різні термохімічні параметри вихідних додаткових матеріалів, теоретично можлива кількість порошку заліза та карбіду хрому становить 19,3 г та 7,1 г на 100 г вихідної екзотермічної суміші відповідно. Під час змінювання співвідношення додаткових вихідних матеріалів їх сумарна кількість змінюється від 7,1% до 19,3%. За результатами розрахунків, без врахування витрат металу під час екзотермічної реакції формування шару термітного сплаву, концентрація порошоків карбіду хрому в термітній суміші може бути не більше ніж 13,5%.

Так, нагрівання термітної суміші до температури 873 К дає змогу отримати теоретичне значення вмісту карбіду хрому в сплаві $\leq 24,5\%$. Проте слід зауважити, що при цьому не представляється можливим внесення порошку заліза. Маса сформованого шару термітного сплаву складає 65,1 г за значенням вихідної маси екзотермічної суміші 100 г.

Таблиця 1 – Розрахункові данні кількості додаткового заліза та карбіду хрому в термітному сплаві

Температура нагрівання, К	Надлишок теплоти, кДж/кг	Кількість одержаного заліза від алюомо-термічної реакції, %	Кількість додатково-го заліза від маси термітної суміші, %	Кількість додатково-го карбіду хрому від маси суміші, %	Додано додатково-го заліза від маси заліза реакції, %	Додано додатково-го карбіду хрому від маси заліза реакції, %
298	448	52,28	19,3	7,1	36,9	13,5
473	559		24,4	8,8	46,0	16,9
673	686		29,6	10,8	56,6	20,7
873	813		35,1	12,8	67,1	24,5

Зменшення кількості карбіду хрому, що додається у додатковому матеріалі із-за різниці в значеннях термохімічних параметрів матеріалів, дозволяє збільшити масу екзотермічного сплаву: на 10% кількості карбіду хрому можливо збільшити масу екзотермічного сплаву на 1,22%.

Після проведення термодинамічних розрахунків були проведені лабораторні дослідження процесу формування шару термітного сплаву на основі системи Fe-Cr-C на сталевій підкладці самопоширюваним високотемпературним синтезом. Було визначено оптимальний вміст металевого наповнювача у нагрітій до 873 К термітній суміші, який склав 40%. Температура термітного сплаву складала в середньому 2574 К.

Виконані додаткові металографічні дослідження зразків термітної шихти на основі хрому (рис. 2) показали на утворення неметалевих включень у вигляді корунду, які створюють ефект інокулюючого модифікування термітного сплаву та сприяють утворенню карбідів хрому.

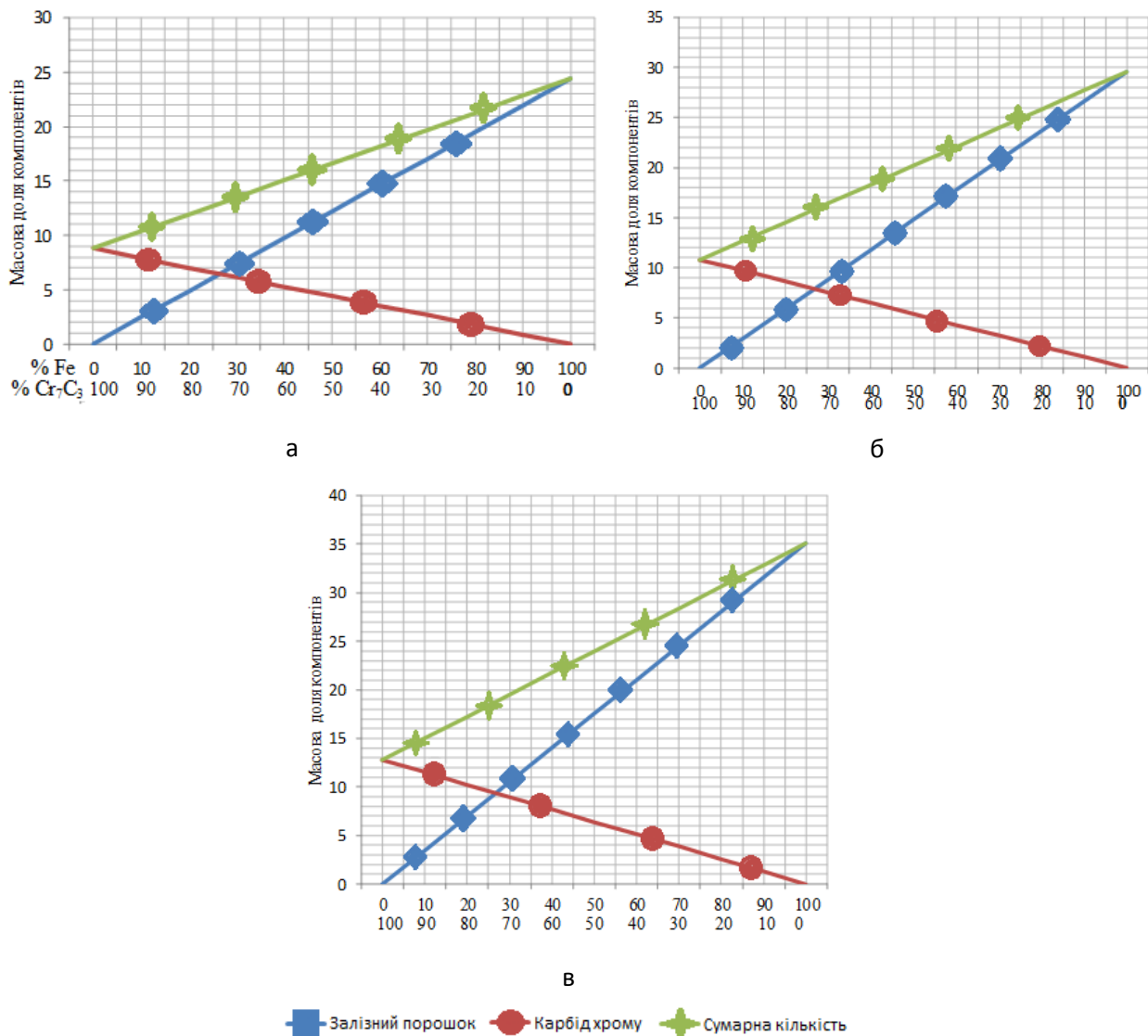


Рисунок 1 – Залежність сумарної кількості додаткового порошку заліза та карбіду хрому від кількості компонентів термітної суміші, що вводять, до термітного сплаву за температури 473 К (а), 673 К (б) та 873 К (в)

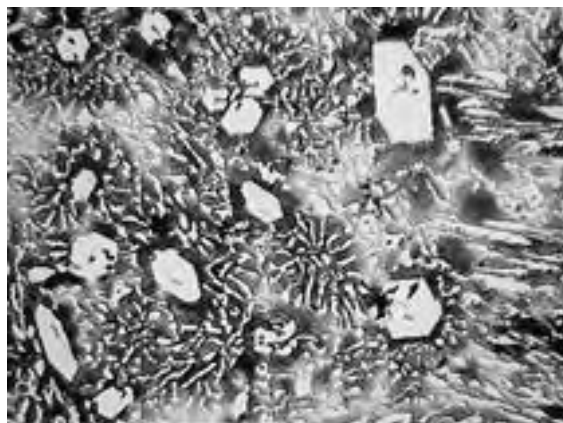


Рисунок 2 – Мікроструктура формування шару термітного сплаву на основі хрому на сталевій підкладці самопоширюваним високотемпературним синтезом

Висновки. Під час формування шару термітного сплаву на основі системи $Fe-Cr-C$ на сталевій підкладці з використанням самопоширюваного високотемпературного синтезу попереднє нагрівання шихтових компонентів термітної суміші призводить до збільшення спікливості продукту, зниженню продуктивності та здороженню процесу синтезу кінцевих СВС-продуктів. Визначено, що в процесі нагрівання термітної суміші з 273 К до 873 К

утворюється 67,1% додаткового заліза та 24,5% карбиду хрому, що вводять від кількості компонентів термітної суміші, при цьому на нагрівання порошку заліза у перерахунок на 1,0 кг суміші витрачають 2318,44 кДж теплоти, а на нагрівання порошку хрому 3314,93 кДж теплоти. Надлишок теплоти, що утворюється від алюмотермічних реакцій, можна витратити на розплавлення додаткової кількості порошку заліза. Металографічні дослідження процесу формування шару термітного сплаву на основі хрому на поверхні сталевій підкладки за допомогою СВС-процесу свідчать про утворення дрібних включень корунду (продуктів екзотермічної реакції оксиду заліза з алюмінієм), які створюють ефект інокуючого модифікування термітного сплаву та сприяють утворенню карбідів хрому.

Бібліографічний перелік

1. Мержанов А. Г., Мукасьян А. С. Твердопламенное горение. Москва: Торус Пресс. 2007. 336 с.
2. Коидзуми М. Химия синтеза сжиганием. Москва: Мир. 1998. 247 с.
3. Мержанов А. Г. Концепция развития СВС как области научно-технического прогресса. Черно-головка: Территория. 2003. 367 с.
4. Кузнецов М. В., Мороз Ю. Г. Огненные технологии или СВС. *Химия и жизнь*. 2004. № 1. С. 16-19.
5. Orru' R., Simoncini B., Carta D., Cao G. On the mechanism of structure and product formation in self-propagating thermite reactions. *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*. 1997. Vol. 6. P. 15-27.
6. Orru' R., Simoncini B., Viridis P.F., Cao G. Self-propagating thermite reactions: effect of alumina and silica in the starting mixture on the structure of the final products. *Metallurgical Science & Technology*. 1997. Vol. 15. No. 1. P. 31-38.
7. Orru' R., Simoncini B., Viridis P.F., Cao G. Mechanism of structure formation in self-propagating thermite reactions: the case of alumina as diluent. *Chemical Engineering Communication*. 1998. Vol. 163. P. 23-36.
8. Евтушенко А.Т. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез инструментальной стали. *Известия Томского политехнического института*. 2008. Т. 313. № 3. С. 100-104.
9. Луцак Д. Л., Криль Я. А., Пилипченко О. В. Застосування самопоширюваного високотемпературного синтезу в технологіях нанесення зносостійких покриттів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2015. № 2. С. 43-50.
10. Ситников А. А., Яковлев В. И., Татаркин М. Е. Новые порошковые материалы из СВС-композиций для электродуговой наплавки износостойких покрытий. *Инновации в машиностроении: Материалы 1-й международной научно-практической конференции*. Бийск: Изд-во АлтГТУ, 2010. С. 191-193.
11. Серета Б. П., Чернета О. Г., Серета Д. Б. Математическое моделирование получения износостойких покрытий с использованием технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. *Перспективні технології та прилади*. 2016. Вип. 8. С. 94-102.
12. Санин В. Н., Андреев Д. Е., Юхвид В. И. СВС-металлургия труб с износостойким защитным покрытием с использованием техногенных отходов металлургических производств. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2011. № 2. С. 37-43.
13. Юхвид В. И. Создание защитных покрытий методами СВС-металлургии. *Наука производству*. 1998. № 8. С. 52-56.
14. Серета Б. П., Белоконов Ю. А., Серета Д. Б., Кругляк И. В. Получение хромоалитированных покрытий на углеродистых материалах в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. Серия: Стародубовские чтения. 2015. Вып. 80. С. 296-301.

15. Белоконь Ю. А., Павленко Д. В., Пахолка С. Н. Получение интерметаллидных титановых сплавов для деталей компрессора газотурбинных двигателей на основе метода самораспространяющегося высокоскоростного синтеза. *Вестник двигателестроения*. 2016. № 1. С. 72-80.
16. Скідін І. Е., Саїтгарєєв Л. Н., Ткач В. В. Дослідження впливу металевого наповнювача термітної шихти на якісні показники сплаву, наплавленого методом СВС. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2017. № 2. С. 66-70.
17. Скідін І. Е., Жбанова О. М. Дослідження показників змін температур при наплавленні методом СВС. *Литво. Металургія-2017: Матеріали XIII Міжнарод. наук.-практ. конф. (23-25 травня 2017 р., м. Запоріжжя)*. Запоріжжя : АА Тандем, 2017. С. 217-219.
18. Жигуц Ю. Ю. Матеріали, синтезовані металотермією і СВС-процесами. *Вісник Сумського державного університету*. Серія Технічні науки. 2005. № 12(84). С. 164-171.
19. Жигуц Ю. Ю., Похмурський В. І., Скиба Ю. Ю., Легета Я. П. Матеріали, синтезовані металотермією і СВС-процесами. *Науковий Вісник Ужгородського університету*. Серія Фізика. 2014. Випуск 16. С. 93-103.
20. Гулієва Н. М. Технологічний процес виготовлення пористих проникних матеріалів. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні*. 2015. № 822. С. 78-85.
21. Кухтов В. Г., Лузан С. А., Сидоренко И. В. О возможностях применения СВС-процессов совместно с газотермическим напылением. *Вісник ХНТУСГ. Механізація сільськогосподарського виробництва*. 2006. Вип. 44. Т. 2. С. 42-46.

References

1. Merzhanov A. G., Mukas'jan A. S. Tverdoplamennoe gorenje. Moskva: Torus Press, 2007. 336 p.
2. Koidzumi M. Himija sinteza szhiganiem. Moskva: Mir, 1998. 247 p.
3. Merzhanov A. G. Konceptcija razvitija SVS kak oblasti nauchno-tehnicheskogo progressa. Chernogolovka: Territorija, 2003. 367 p.
4. Kuznecov M. V., Moroz Ju. G. Ognennye tehnologii ili SVS. *Himija i zhizn'*. 2004. no. 1. pp. 16-19.
5. Orru' R., Simoncini B., Carta D., Cao G. On the mechanism of structure and product formation in self-propagating thermite reactions. *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*. 1997. vol. 6. pp. 15-27.
6. Orru' R., Simoncini B., Viridis P.F., Cao G. Self-propagating thermite reactions: effect of alumina and silica in the starting mixture on the structure of the final products. *Metallurgical Science & Technology*. 1997. vol. 15. no. 1. pp. 31-38.
7. Orru' R., Simoncini B., Viridis P.F., Cao G. Mechanism of structure formation in self-propagating thermite reactions: the case of alumina as diluent. *Chemical Engineering Communication*. 1998. vol. 163. pp. 23-36.
8. Evtushenko A. T. Samorasprostranjajushhijja vysokotemperaturnyj sintez instrumental'noj stali. *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo instituta*. 2008. t. 313. no. 3. pp. 100-104.
9. Lucak D. L., Kril' Ja. A., Pilipchenko O. V. Zastosuvannja samoposhirjuvanogo visokotemperaturnogo sintezu v tehnologijah nanesennja znosostijkih pokryttiv. *Rozvidka ta rozrobka naftovih i gazovih rodovishh*. 2015. no. 2. pp. 43-50.
10. Sitnikov A. A., Jakovlev V. I., Tatarkin M. E. Novye poroshkovye materialy iz SVS-kompozitov dlja jelektrodugovoj naplavki iznosostojkih pokrytij. *Innovacii v mashinostroenii: materialy 1-j mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. Bijsk: AltGTU Publ., 2010. pp. 191-193.
11. Sereda B. P., Cherneta O. G., Sereda D. B. Matematicheskoe modelirovanie poluchenija iznosostojkih pokrytij s ispol'zovaniem tehnologii samorasprostranjajushhegosja vysokotemperaturnogo sinteza. *Perspektivni tehnologii ta priladi*. 2016. vol. 8. pp. 94-102.
12. Sanin V. N., Andreev D. E., Juhvid V. I. SVS-metallurgija trub s iznosostojkim zashhitnym pokrytiem s ispol'zovaniem tehnogennyh othodov metallurgicheskikh proizvodstv. *Izvestija vuzov. Poroshkovaja metallurgija i funkcional'nye pokrytija*. 2011. no. 2. pp. 37-43.
13. Juhvid V. I. Sozdanie zashhitnyh pokrytij metodami SVS-metallurgii. *Nauka proizvodstvu*. 1998. no. 8. pp. 52-56.

14. Sereda B. P., Belokon' Yu. A., Sereda D. B., Krugljak I. V. Poluchenie hromoalitivovannykh pokrytij na uglerodistykh materialah v uslovijah samorasprostranjajushhegosja visokotemperaturnogo sinteza. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie*. Ser.: Starodubovskie chtenija. 2015. vol. 80. pp. 296-301.
15. Belokon' Yu. A., Pavlenko D. V., Paholka S. N. Poluchenie intermetallidnykh titanovykh splavov dlja detalej kompressora gazoturbinnnykh dvigatelej na osnove metoda samorasprostranjajushhegosja vysokoskorostnogo sinteza. *Vestnik dvigatelestroenija*. 2016. no. 1. pp. 72-80.
16. Skidin I. E., Saithareev L. N., Tkach V. V., Kalinin F. T., Zhananova E. N. Doslidzhennya vplyvu metalovoho napovnyuvacha termitnoyi shykhty na yakisni pokaznyky splavu, naplavljenoho metodom SVS. *Novi materialy i tekhnolohiji v metalurhiji ta mashynobuduvanni*. 2017. no. 2. pp. 66-70.
17. Skidin I. E., Zhananova O. M. Doslidzhennya pokaznykiv zmin temperatur pry naplavlenni metodom SVS. *Lytvo. Metalurhiya-2017: materialy XIII Mizhnarod. nauk.-prakt. conf. (Zaporizhzhya, 23-25 travnya 2017)*. Zaporizhzhya: AA Tandem, 2017. pp. 217-219.
18. Zhyhuts Yu. Yu. Materialy, syntezovani metalotermiyeyu i SVS-protsesamy. *Visnyk Sums'koho derzhavnoho universytetu*. Ser. Tekhnichni nauky. 2005. no. 12(84). pp. 164-171.
19. Zhyhuts Yu. Yu., Pokhmurs'kyy V. I., Skyba Yu. Yu., Leheta Ya. P. Materialy, syntezovani metalotermiyeyu i SVS-protsesamy. *Naukovyy Visnyk Uzhhorods'koho universytetu*. Ser. Fyzyka. 2014. vol. 16. pp. 93-103.
20. Hulyyeva N. M. Tekhnolohichnyy protses vyhotovlennya porystykh pronyknykh materialiv. *Visnyk Natsional'noho universytetu «L'vivs'ka politekhnika»*. *Optyimizatsiya vyrobnychykh protsesiv i tekhnichnyy kontrol' u mashynobuduvanni ta prykladobuduvanni*. 2015. no. 822. pp. 78-85.
21. Kuhtov V. G., Luzan S. A., Sidorenko I. V. O vozmozhnostjakh primenenija SVS-processov sovmestno s gazotermicheskim napyleniem. *Visnik HNTUSG. Mehanizacija sil'skogospodars'kogo virobnictva*. Kharkiv: HNTUSG, 2006. t. 2. vol. 44. pp. 42-46.

Skidin Ihor, senior lecturer, Kryvyi Rih National University.

Vodennikova Oksana, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporozhe national university.

Vodennikov Sergii, professor, doctor of technical sciences, Zaporozhe polytechnic national university.

Saithareiev Levan, associate professor, candidate of technical sciences, Kryvyi Rih National University.

Baboshko Dmytro, senior lecturer, candidate of technical sciences, Kryvyi Rih National University.

CALCULATION OF THE FORMATION PROCESS OF TERMITIC ALLOY LAYER ON A STEEL SUBSTRATE DURING SHS PROCESS

The most perspective directions of realization of process of self - propagating high - temperature synthesis (SHS) are considered. It is shown that in the SHS process special attention is paid to the mechanism of structure formation and product formation in self-propagating thermite reactions. In order to obtain dense SHS material with high functional characteristics, it is necessary to take into account the patterns of combustion of the reaction mixture, the formation of chemical and phase compositions of the final product and the mode of crystallization of the alloy. In the laboratory, the process of formation of thermite alloy layer based on the Fe-Cr-C system on a steel substrate using self-propagating high-temperature synthesis is considered. It is shown that preheating of the charge components of the thermite mixture leads to an increase in the hotness of the product, reduces productivity and increases the cost of synthesis of the final SHS products, but does not reduce the likelihood of nonstoichiometric compounds. Calculations show that the concentration of chromium carbide powders in the charge to form a layer of thermite alloy can't be more than 13.5%. In the process of heating the thermite mixture from 273 K to 873 K, 67.1% of additional iron and 24.5% of chromium carbide are formed, which is introduced from the number of components of the thermite mixture. 2318.44 kJ of heat is used to heat the iron powder, and 3314.93 kJ of heat is used to heat the chromium powder per 1 kg of mixture. The optimal content of metal filler in the thermite mixture heated to 873 K is 40%. It is shown that the excess heat generated during

aluminothermic reactions can be spent on melting an additional amount of iron powder. Metallographic studies of samples of the formed layer of thermite alloy from chromium-based charge showed the formation of small inclusions of corundum. These are the products of the exothermic reaction of iron oxide with aluminum, which create the effect of inoculating modification of thermite alloy and promote the formation of chromium carbides.

Стаття надійшла: 02.11.2020 р.

УДК 620.22:661.666-0.37

DOI <https://doi.org/10.26661/2071-3789-2020-1-09>

Скачков Віктор Олексійович, професор, доктор технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-4447-4641

Карпенко Ганна Володимирівна, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0003-3504-0283

Румянцев Володислав Ростиславович, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0003-3182-2536

Куріс Юрій Володимирович, провідний науковий співробітник, доктор технічних наук, Інститут технічної теплофізики НАНУ, м. Київ. ORCID: 0000-0001-7169-9187

Мосейко Юрій Вікторович, доцент, кандидат педагогічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0003-4675-5221

Мовчан Володимир Леонідович, студент, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОСАДЖЕННЯ БАГАТОКОМПОНЕНТНОЇ СУСПЕНЗІЇ ПІД ЧАС ОДЕРЖАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ КОМПОЗИТІВ З НИЗЬКОЮ ЩІЛЬНІСТЮ

Виконано дослідження процесу осадження багатокомпонентної суспензії за одержанням вуглецевих композитів з низькою щільністю. Розроблено математичну модель, використання якої дає змогу обчислити технологічні параметри одержання осаду заданої щільності. Вивчено вплив ефективного опору фільтру та товщини шару осаду на швидкість витікання суспензії. Визначено залежність часу витікання суспензії від значень залишкового та гідравлічного опору рідини. Виявлено розподіл щільності за висотою осадженої заготовки, а також змінювання її маси під час сушіння.

Ключові слова: вуглецеві композити, осадження з водяних суспензій, математична модель, формування осаду часточок, низька щільність

Вступ. У промисловості виробляють значну кількість композиційних матеріалів, що складаються з вуглецевих волокон різного типу та вуглецевої матриці, властивості яких варіюють у широких межах [1-5].

Високотемпературні матеріали з низькою щільністю мають особливе значення для сучасної техніки, оскільки характеризуються високим рівнем експлуатаційних параметрів, у тому числі низькі щільність і теплопровідність, що дозволяє забезпечувати можливість їх використання за високої температури.

Аналіз досягнень. Формування вуглецевих композитів з низькою щільністю методом осадження з водяної суспензії є найменш поширеним і недостатньо дослідженим порівняно з іншими методами одержання зазначеного класу матеріалів. Процес одержання зазначених вуглецевих композитів методом осадження суспензії передбачає застосування технологічної схеми [6-9], що містить:

- приготування вуглецевих волокон на основі віскози шляхом карбонізації віскозних волокон і подрібнення вуглецевих волокон;
- приготування порошку фенолоформальдегідної смоли;
- приготування порошку форполімеру й органічних пороутворювачів;
- приготування водяної суспензії;
- осадження суспензії на фільтр і сушіння одержаної заготовки;
- виконання високотемпературної обробки (карбонізації);
- поверхневе зміцнення (за необхідності).

Однією з найбільш відповідальних операцій зазначеної технологічної схеми є процес осадження багатокомпонентної суспензії, який супроводжується явищами седимента-

ції її компонентів, змінюванням ефективного опору витіканню рідкої фази як результату збільшення висоти осадку та формуванням його щільності.

Постановка завдання. Розробити математичну модель процесу осадження суспензії, використання якої дає змогу із високою точністю обчислювати параметри процесу з формуванням осадку заданої щільності під час виготовлення вуглецевих композитів з низькою щільністю.

Основна частина досліджень. Для виконання оцінки впливу значення залишкового тиску, об'ємної витрати води, ефективного опору фільтру, а також опору шару спакованих часточок, що зростає, у процесі одержання зазначених вуглецевих композитів виконують розробку математичної моделі, що враховує концентрацію кожного з компонентів водної суспензії, а також швидкість осадження кожної фракції.

Математичну модель процесу формування осаду під час осадження з урахуванням збільшення його товщини подають у вигляді системи двох кінетичних рівнянь:

$$\frac{dQ}{S \cdot d\tau} = \frac{P_h + (Q/S) \cdot \rho}{R_\phi + k \cdot h}, \quad (1)$$

$$\frac{dh}{d\tau} = \frac{dQ}{S d\tau} \cdot \frac{C}{C_n} + \sum_{i=1}^N \frac{V_i \cdot C_i}{C_n^i} \quad (2)$$

де Q – об'ємна витрата рідини, м³; S – площа фільтру, м²; τ – тривалість процесу осадження, с; P_h – залишковий тиск вакуумування, кг/м²; ρ – щільність рідини, що витікає, кг/м³; R_ϕ – ефективний опір фільтру, кг·с/м³; k – ефективний коефіцієнт об'ємного опору шару спакованих часточок, кг·с/м⁴; h – висота шару спакованих часточок, м; C – загальна концентрація всіх часточок у рідині, кг/м³; C_n – концентрація спакованих часточок, кг/м³; V_i – швидкість осадження i -ої фракції під час седиментації, м/с; C_i – концентрація часточок i -тої фракції у рідині, кг/м³; C_n^i – концентрація спакованих часточок i -тої фракції, кг/м³.

Рівняння (1) задає швидкість витікання рідкої фази суспензії, рівняння (2) – швидкість зростання шару спакованих часточок [10].

Для визначення ефективного опору фільтру з висотою шару спакованих часточок, що зростає, виконано спеціальні експерименти за наступною схемою. Заданий об'єм суспензії осаджували на фільтрі з формуванням шару спакованих часточок заданої товщини h . Через сформований шар пропускали чисту воду з різним гідростатичним натиском і залишковим тиском вакуумування. Визначали тривалість витікання заданого об'єму води від фіксованого початкового об'єму V_0 . Дослідні значення швидкості витікання суспензії залежно від товщини шару та ефективного опору фільтру подано у табл. 1.

Виконують інтегрування рівняння (1) за умови постійності товщини осадженого шару h :

$$R_\phi + k \cdot h = \frac{\tau}{\ln\left(\frac{P_h \cdot S + Q_0 \cdot Q}{P_h \cdot S + Q_0}\right)}. \quad (3)$$

Використовуючи дані, що наведено у табл. 1, а також рівняння (3), маємо:
 $R_\phi = 2700$ кг·с/м³; $k = 2,8 \cdot 10^4$ кг·с/м³.

Аналіз одержаних результатів дає змогу встановити, що ефективний опір фільтру з осадом зростає із збільшенням товщини осадженого шару, а швидкість витікання рідини знижується із збільшенням товщини осаду.

Таблиця 1 – Дослідні значення ефективного опору осадженого шару різної товщини

Товщина осадженого шару, мм	Значення залишкового тиску, кг/м ²	Початковий об'єм, мл	Об'єм, що витікає, мл	Тривалість витікання, с	Ефективний опір фільтру, кг·с/м ³
24	0,60	400	200	70	3674
24	0,60	800	200	29	3174
50	0,86	1100	100	24	3759
50	0,80	400	100	36	5021
50	0,86	2500	200	39	3123
71	0,50	400	100	72	6371
71	0,84	1600	200	102	7931
240	0,62	2500	200	176	10506
240	0,88	900	200	137	10792
240	0,80	1600	200	114	8606
240	0,80	1200	300	196	9571

Виконуючи інтегрування рівняння (2), а також здійснюючи підставлення отриманої формули до рівняння (1), можна записати

$$\frac{dQ}{d\tau} = \frac{P_h \cdot S + Q \cdot \rho}{\left(R + \frac{k \cdot C \cdot Q_0}{S \cdot C_n} \right) + k \cdot \left[\frac{C \cdot Q}{S \cdot C_n} + \left(\sum_{i=1}^N \frac{V_i \cdot C_i}{C_n^i} \right) \cdot \tau \right]}, \quad (4)$$

де Q_0 – початковий об'єм суспензії, м³.

Після інтегрування рівняння (4) отримують трансцендентне рівняння, що має вигляд:

$$\left(\frac{V \cdot U_n}{U \cdot V_n} \right)^A \cdot \left(\frac{(V/U) - R_2}{(V_n/U_n) - R_2} \right)^B = \frac{U}{U_n}, \quad (5)$$

$$\text{де } V = Q - \frac{P_h \cdot S}{\rho}; \quad V_n = Q_0 - \frac{P_h \cdot S}{\rho}; \quad U = \tau - \frac{R_\phi + \frac{k \cdot C \cdot Q}{S \cdot C_n}}{\sum_{i=1}^N \frac{V_i \cdot C_i}{C_n^i}}; \quad U_n = - \frac{R_\phi + \frac{k \cdot C \cdot Q_0}{S \cdot C_n}}{\sum_{i=1}^N \frac{V_i \cdot C_i}{C_n^i}};$$

$$R_2 = \frac{\left(\rho - \sum_{i=1}^N \frac{V_i \cdot C_i}{C_n^i} \right) \cdot S \cdot C_n}{k \cdot C}; \quad A = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{V_i \cdot C_i}{C_n^i}}{R_2}; \quad B = \frac{k \cdot C}{S \cdot C_n} - A.$$

З використанням рівняння (5) можна виконати обчислення витрати рідини Q через фільтр залежно від тривалості процесу осадження τ з урахуванням залишкового тиску вакуумування R_ϕ та висоти зростаючого шару спакованих часточок h .

Чисельне вирішення рівняння (4) відносно часу процесу осадження виконували на ПЕВМ з використанням програми на алгоритмічній мові «TURBO PASCAL».

Результати обчислень щодо визначення залежності тривалості витікання суспензії від значень залишкового тиску та гідростатичного натиску наведено у табл. 2.

Із включенням вакуумного насоса з'являється різниця тисків над системою фільтрів і під нею. Над системою фільтрів діє сила гідростатичного натиску, яку створено стов-

пом суспензії, під фільтром встановлюється залишковий тиск. Різниця тисків є рушійною силою процесу осадження часточок суспензії. Швидкість витікання рідини накладається на швидкість осадження часточок, збільшуючи швидкість зростання шару спакованих часточок, які знаходяться у суспензії. Безпосередньо на системі фільтрів і в зоні гранично високих концентрацій часточок відбувається процеси формування структури заготовки.

Таблиця 2 – Залежність тривалості витікання рідкої фази від значень залишкового тиску та гідростатичного натиску

Залишковий тиск рідини, МПа	Тривалість витікання, с		
	гідростатичний натиск, МПа		
	0,001	0,002	0,005
0	45	76	132
0,2	63	102	171
0,4	69	131	200
0,6	142	201	274
0,8	363	419	481
1,0	432	521	590

Змінювання щільності за висотою висушеної заготовки зумовлена двома чинниками: швидкістю витікання рідини та процесом седиментації. Нижні, щільніші шари заготовки формуються процесом витікання рідини з урахуванням часткової седиментації часточок. Середні шари заготовки утворюються за рахунок більшого впливу процесу седиментації та витікання рідини. Для цих шарів характерними є часточки більших фракцій, гранична щільність упаковки яких є низькою. Верхні шари осаду формуються в основному за рахунок витікання рідини. Часточки, що утворюють верхні шари, характеризуються наявністю найбільш дрібних фракцій, які є частками фенолоформальдегідної смоли. Як наслідок, щільність верхніх шарів осаду є значно вищою, ніж щільність середнього та нижнього його шарів.

Окрім того, виконували експерименти щодо вивчення процесу сушіння осадженої заготовки. Під час сушіння значення залишкового тиску складає $0,1 \text{ кг/м}^2$. Результати досліджень наведено у табл. 3.

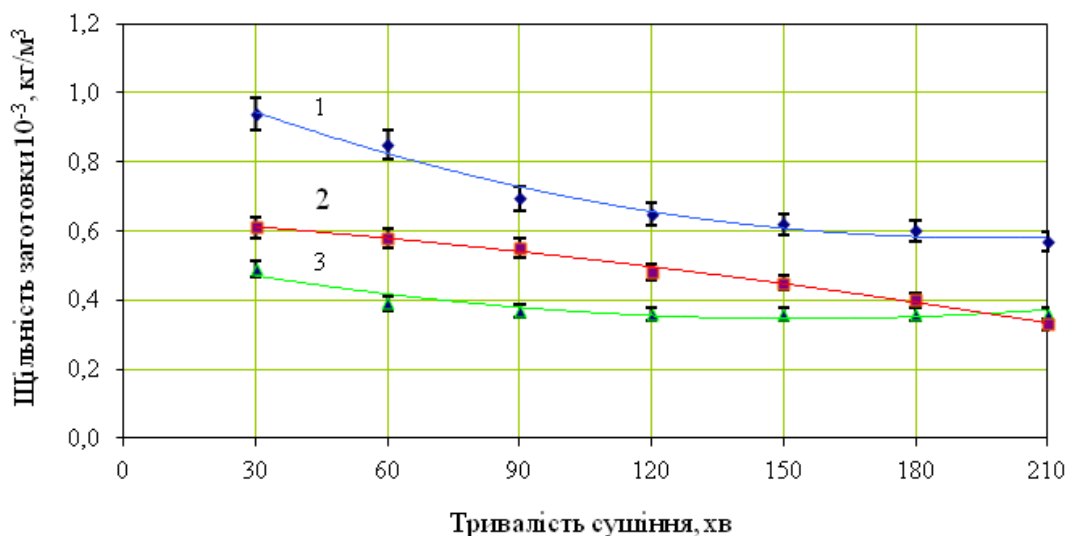
Таблиця 3 – Змінювання маси заготовки під час сушіння, %

Температура, К	Тривалість сушіння, хв.						
	30	60	90	120	150	180	210
353	3	6	15	18	24	27	33
373	5	8	14	19	26	29	36
393	6	10	15	30	45	53	58

Середній шар формується за рахунок великих фракцій порошкоподібних компонентів суспензії. Упаковка таких часточок визначає щільність цього шару заготовки в інтервалі від $0,6 \cdot 10^3$ до $0,36 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Нижній шар осаду формується з рівномірних за гранулометричним складом часточок, внаслідок чого щільність нижньої частини заготовки під час сушіння складає в діапазоні від $0,48 \cdot 10^3$ до $0,36 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Розподіл щільності за висотою висушеної заготовки подано у табл. 4, нерівномірність щільності складає 25%. Одночасно, для нижньої частини заготовки щільність становить $0,35 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, її середньої частини – $0,26 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, верхньої частини – $0,33 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.



1, 2, 3 - верхня, середня та нижня частини заготовки відповідно
Рисунок 1 – Змінювання щільності заготовки під час сушіння за температури 393 К

Таблиця 4 – Змінювання щільності за висотою висушеної заготовки

Висота висушеної заготовки, мм	0	40	80	120	160	200	240
Щільність висушеної заготовки, 10 ³ кг/м ³	0,350	0,282	0,261	0,268	0,269	0,312	0,328

Висновки.

1. Розроблено математичну модель процесу осадження суспензії, що враховує швидкість витікання рідини та зростання шару спакованих часточок. Розрахунковим шляхом визначено значення залишкового тиску та гідростатичного натиску, які забезпечують необхідний розподіл щільності за висотою осадженої заготовки із заданим вмістом компонентів.

2. Вивчено параметри технологічного режиму сушіння осадженої заготовки: температура сушіння – 393 К, тривалість витримки за максимальної температури – 3 год.

3. Визначено розподіл щільності за висотою висушеної заготовки, що складає у нижній частині від $0,3 \cdot 10^3$ кг/м³ до $0,35 \cdot 10^3$ кг/м³, у середній частині від $0,26 \cdot 10^3$ кг/м³ до $0,3 \cdot 10^3$ кг/м³ та у верхній частині від $0,25 \cdot 10^3$ кг/м³ до $0,32 \cdot 10^3$ кг/м³. Зазначений розподіл щільності дає змогу забезпечити рівномірний розподіл щільності за об'ємом заготовки з розсіюванням $\pm 0,01 \cdot 10^3$ кг/м³.

Бібліографічний перелік

1. Бутырин Г. М. Высокопористые углеродные материалы. Москва : Химия, 1976. 192 с.
2. Углеродные волокна и углекомпозиаты. Пер. с англ. / Под ред. Э. Фитцера. Москва : Мир, 1988. 336 с.
3. Фиалков А. С. Углерод, межслоевые соединения и композиты на его основе. Москва : Аспект Пресс, 1997. 714 с.
4. Бушуев Ю. Г., Персин М. И., Соколов В. А. Углерод-углеродные композиционные материалы. Справочник. Москва : Металлургия, 1994. 128 с. ISBN 5-229-01167-X.
5. Мелешко А. И., Половников С. П. Углерод, углеродные волокна, углеродные композиты. Москва : Сайнс-пресс, 2007. 194 с. ISBN 5-88070-119-0.
6. Скачков В. А., Кудиевский С.С., Карпенко А. В., Шаповалов Р. А. Формирование заготовок углерод-углеродных композиционных материалов из водных суспензий. *Металлургия. Труды ЗГИА*. Запорожье : РИО ЗГИА, 1999. Вып. 2. С. 82-86.

7. Карпенко Г. В. Одержання низькощільних карбонізованих матеріалів *Металлургия. Труды ЗГИА*. Запорожье : РИО ЗГИА, 2006. Вып. 13. С. 139-141.
8. Карпенко А. В. Научные основы получения низкоплотных теплоизоляционных материалов методом разлива из водных суспензий. *Вопросы химии и химической технологии*. 2006. Вып. 8. С. 138-142.
9. Карпенко А. В., Скачков В. А., Червоний И. Ф. Получение низкоплотных углеродных карбонизованных материалов. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2013. 1/5 (61). С. 48-51.
10. Нелинейные задачи динамики вязкой жидкости / Под ред. И. Е. Березина. Свердловск : УрО-АН СССР, 1990. 156 с.

References

1. Butyrin G. M. *Vysokoporistye uglerodnye materialy*. Moskva : Khimiya, 1976. 192 p.
2. *Uglerodnye volokna i uglekompozity*. Per. s ang. / Pod red. E. Fishera. Moskva : Mir, 1988. 336 p.
3. Fialkov A. S. *Uglerod, mezhshloevye sordineniya i kompozity na ego osnove* Moskva : Aspekt Press, 1997. 714 p.
4. Bushuev Yu. G., Persin M. I., Sokolov V. A. *Uglerod-uglrodnye kompozitsionnye materialy*. Spravochnik. Moskva : Metallurgiya, 1994. 128 p. ISBN 5-229-01167-X.
5. Meleshko A. I., Polovnikov S. P. *Uglerod, uglerodnye volokna, uglerodnye kompozity*. Moskva : Sayns-press, 2007. 194 p. ISBN 5-88070-119-0.
6. Skachkov V. A., Kudievskiy S. S., Karpenko A. V., Shapovalov R. A. *Formirovanie zagotovok uglerod-uglerodnykh kompozitsionnykh materialov iz vodnykh suspenziy*. Metallurgiya. Trudy ZGIA. Zaporozhe : RIO ZGIA, 1999. vol. 2. pp. 82-86.
7. Karpenko H. V. *Oderzhannya nyzkoshchilnykh karbonizovanykh materialiv*. Metallurgiya Trudy ZGIA. Zaporozhe : RIO ZGIA, 2006. vol. 13. pp. 139-141.
8. Karpenko A. V. *Nauchnye osnovy polucheniya nizkoplotnykh teploizolyatsionnykh materialov metodom razliva iz vodnykh suspenziy*. Voprosy khimii i khimicheskoy tekhnologiy. 2006. vol. 8. pp. 138-142.
9. Karpenko A. V., Skachkov V. A., Chervony I. F. *Poluchenie nizkoplotnykh uglerodnykh karbonizovanykh materialov*. Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy. 2013. no. 1/5 (61). pp. 48-51.
10. *Nelineynye zadachi dinamiki vyazkoy zhidkosti* / Pod red. I. E. Berezina. Sverdlovsk : UrO AN SSSR, 1990. 156 p.

Skachkov Viktor, professor, doctor of technical sciences, Zaporozhe national university.

Karpenko Hanna, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporozhe national university.

Rumyantsev Vladyslav, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporozhe national university.

Kuris Yurii, chief researcher, doctor of technical sciences, institute of engineering theplophysic NANU, Kyiv.

Mosejko Yurii, associate professor, candidate of pedagogic sciences, Zaporozhe national university

Movchan Vladimir, student, National university of ship-building, c. Nikolaev.

RESEARCHES OF PROCESS DEPOSITION FOR MULTICOMPONENT SUSPENSION AT PRODUCTION OF LOW-COMPACTED CARBON COMPOSITES

One of methods for production of carbon composition materials is a casting of aquatic suspensions, which foresees preparation of aquatic suspension of the set classification and concentration composition, forming of carboplastic billet by the aquatic suspension deposition on filters, drying of the bullet with subsequent realization of high temperature treatment. The deposition of aquatic suspension is accompanied by the phenomena of sedimentation of its components, change of effective resistance to outflow of rare phase as a result of increase of sediment height

and forming of its density. Calculation and experimental researches of multicomponent aquatic suspension deposition at the production of low-compacted carbon composites is performed. The mathematical model of forming of sediment taking into account the increase of its thickness is worked out which is presented as a system of two kinetic equations. The first equation sets speed of outflow of liquid phase of suspension, second equation - speed of growth for layer of the wrapped particles. By its transformation transcendent equation for determination of suspension outflow duration of from filters is got. The numeral decision of the indicated equation was performed on computer with the use of algorithmic language of «Turbo Pascal». Influence of effective resistance of filter and thickness sediment layer of is studied on speed of suspension outflow. Dependence of time of suspension outflow on the sizes of remaining and hydraulic resistance of liquid is certain. Distribution of closeness is educed on the height of the poured off purveyance, and also changes of billet mass at drying.

Стаття надійшла: 17.09.2020 р.

Чернявська Тетяна Василівна, аспірант, Херсонська державна морська академія, м. Херсон.
ORCID: 0000-0003-4019-9715

ВЛАСТИВОСТІ ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИТІВ, НАПОВНЕНИХ ФІТИНОВОЮ КИСЛОТОЮ

Для формування композитних матеріалів і захисних покриттів для транспортної галузі використовують епоксидний діановий олігомер ЕД-20, поліетиленполіамін ПЕПА та мікродисперсні часточки фітинової кислоти. Досліджено залежність вмісту мікродисперсного порошку на адгезійні, фізико-механічні властивості та теплостійкість епоксидних композитів. Отримані результати досліджень фізико-механічних властивостей композитних матеріалів узгоджуються з результатами випробувань зразків з адгезійними характеристиками, що свідчить про їх достовірність.

Ключові слова: епоксидний композит, модуль пружності, ударна в'язкість, руйнівні напруження при згинанні, теплостійкість

Постановка проблеми. Судна сучасного флоту завдяки значній автономності плавання відзначаються не лише надійністю деталей обладнання, але і їх ремонтоздатністю, у тому числі за умов рейсу. У цьому плані актуальним є використання полімерних композитних матеріалів і захисних покриттів на їх основі. Незважаючи на широкий спектр відомих на сьогодні полімерних композитів найбільш поширеними є антикорозійні адгезиви на основі епоксидних олігомерів. Під час формування таких матеріалів на стадії зшивання до в'язучого вводять різного роду додавання, які забезпечують підвищення ступеня гелеутворення гетерогенних систем та, як наслідок, призводять до поліпшення їх властивостей. При цьому слід зазначити, що сучасні судна піддаються впливу динаміки кліматичних навантажень внаслідок роботи у різних часових поясах у невеликому часовому проміжку. Це передбачає експлуатацію як корпусів суден, так машин і механізмів під впливом динаміки критичних температур, що призводить до швидкого старіння обладнання. В першу чергу, це стосується захисних антикорозійних покриттів, які піддаються впливу водночас динамічних механічних і термічних навантажень. Тому дослідження й аналіз адгезійних, механічних, теплофізичних властивостей полімерних покриттів за різних умов експлуатації є актуальною задачею забезпечення надійності деталей і транспортних засобів у цілому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Авторами робіт [1-3] показано, що створення нових матеріалів з підвищеними експлуатаційними характеристиками є неможливим без розуміння механізму взаємодії на межі поділу фаз «захисне покриття – металева основа» та «полімерна матриця – наповнювач», що є основою реалізації хімічних та фізичних зв'язків, які визначають довговічність матеріалів. Для реалізації наведеного вище до полімерного в'язучого вводять активні до взаємодії дисперсні часточки наповнювача. Важливим є наявність на поверхні додавань активних груп, які під час полімеризації матриці формують значну кількість зв'язків на одиницю об'єму полімеру. У роботах [1-5] показано, що перспективним є використання порошків із часточок незначної дисперсності. Враховуючи це, важливим є виконання досліджень стосовно визначення оптимального вмісту активної до міжфазової взаємодії фітинової кислоти під час формування захисних полімерних покриттів для поліпшення адгезійних і механічних властивостей деталей транспортної галузі.

Мета роботи – дослідження впливу вмісту фітинової кислоти на адгезійні та механічні властивості епоксидних композитів для транспортної галузі.

Матеріали та методика дослідження. Вихідним матеріалом для формування полімерної матриці вибрано епоксидно-діанову смолу марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84), яка є високов'язкою прозорою рідиною, що твердне за кімнатної або підвищеної температури без зовнішнього тиску. Можливість тверднення таких смол без виділення побічних продуктів забезпечує малу усадку, високу щільність та низьку пористість матеріалів, що важливо під час роботи виробів з композитів та захисних покриттів на їх основі у складних умовах.

Для тверднення епоксидних композицій застосовано поліетиленполіамін – ПЕПА (ТУ 6-02-594-70), який призначено для структуроутворення епоксидних смол за кімнатної та пониженої температури в умовах підвищеної вологості. Зшивали композити, вводячи твердник до композиції за стехіометричним співвідношенням компонентів за вмістом – ЕД-20 : ПЕПА – 100 : 10.

Для поліпшення властивостей композитів використовували часточки фітинової кислоти дисперсністю 8...10 мкм з молекулярною формулою: $C_6H_{18}O_{24}P_6$ і молярною масою 660,04 г/моль.

Фітинова кислота (або міо-інозінгексафосфорна кислота) є складним ефіром циклічного шестиатомного поліспирту міо-інозиту (або міо-інозиту) та і шести залишків ортофосфорної кислоти. Повна назва даної сполуки точно характеризує її хімічну будову: вставка «міо» вказує на певну орієнтацію гідроксильних груп щодо інозитоного кільця, префікс «гексакіс» (на відміну від «гекса») означає, що фосфатні групи не пов'язані між собою. Загальний вигляд структури у вигляді хімічних зв'язків фітинової кислоти наведено на рис. 1. Фосфати інозиту складаються з інозитоного кільця та, як мінімум, однієї фосфатної групи. До інозитоного кільця за допомогою складноєфірних зв'язків приєднано шість фосфатних груп.

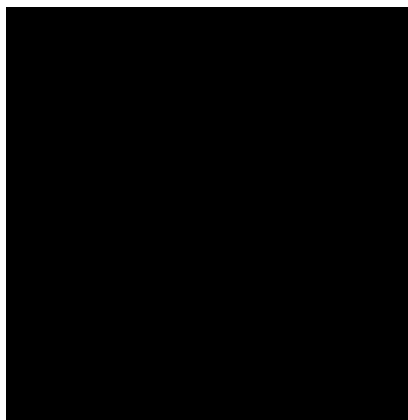


Рисунок 1 – Загальний вигляд хімічних зв'язків фітинової кислоти

Технологія формування епоксидних композитів полягає у наступному. На початковому етапі підігривають епоксидну смолу до температури $T = 353 \pm 2$ К, піддають витримці у тепловому полі впродовж часу $\tau = 20 \pm 0,1$ хв. Далі гідродинамічно суміщають смолу з дисперсним наповнювачем впродовж $\tau = 10 \pm 0,1$ хв., після чого виконують ультразвукову обробку (УЗО) композиції впродовж $\tau = 1,5 \pm 0,1$ хв. Після охолодження суміші до кімнатної температури ($\tau = 60 \pm 5$ хв.) вводять твердник і перемішують композицію впродовж $\tau = 5 \pm 0,1$ хв.

Досліджували адгезійну міцність, руйнівні напруження та модуль пружності за згинанням, ударну в'язкість і теплостійкість композиту.

Вивчали вплив вмісту додавань різної природи на адгезійні властивості композитів до металевої основи. При цьому вимірювали руйнівні напруження («метод грибків») за рівномірного відриву пари склеєних зразків відповідно до ГОСТ 14760-69 (рис. 2). Адге-

зйну міцність досліджували на автоматизованій розривній машині УМ-5 за швидкості навантаження $v = 10$ Н/с. Діаметр робочої частини сталевих зразків становив $d = 25$ мм.

Руйнівні напруження за згинанням визначали відповідно до ГОСТу 4648-71, а модуль пружності за згинанням – відповідно до ГОСТу 9550-81. Досліджені зразки мають довжину $l = 120 \pm 2$ мм, ширину $b = 15 \pm 0,5$ мм і висоту $h = 10 \pm 0,5$ мм.

Ударну в'язкість визначали методом Шарпі згідно ГОСТу 4647-80. Метод ґрунтується на випробуванні, коли зразок, що поміщають на двох опорах, зазнає удару маятника, причому лінія удару знаходиться посередині між опорами та безпосередньо навпроти надрізу у разі зразків із надрізом. Досліджені зразки мають розміри: $(63,5 \times 12,7 \times 12,7) \pm 0,5$ мм з відстанню між опорами $40 \pm 0,5$ мм.

Відхилення значень показників адгезійних і фізико-механічних властивостей композитів під час досліджень становить 4...6% від номінального.

Теплостійкість (за Мартенсом) композиту визначали відповідно до ГОСТу 21341-75.

Обговорення результатів експерименту. Як було зазначено вище, важливим для покращення властивостей матеріалів, призначених для підвищення надійності та ремонтоздатності засобів транспорту, є використання хімічно-активних до міжфазової взаємодії дисперсних наповнювачів. У цьому плані цікавим є застосування як модифікуючого додання дисперсних часточок фітинової кислоти. Фітинова кислота є органічним екологічно чистим продуктом, активним до фізико-хімічної взаємодії з органічними та синтетичними речовинами, що, на наш погляд, поліпшить механічні і теплофізичні властивості захисних покриттів. Вважали, що завдяки активності поверхні часточок та їх незначній дисперсності ($d = 8...10$ мкм) доцільно вводити до епоксидного олігомеру додання за гомеопатичного вмісту [у кількості 0,25...1,00 масових часточок (мас.ч.) на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20].

Експериментально встановлено (рис. 2, а), що для вихідної епоксидної матриці адгезійна міцність становить $\sigma_a = 24,8$ МПа. Введення часточок фітинової кислоти у кількості $q = 0,25$ мас.ч. забезпечує підвищення адгезійної міцності за відриванням до $\sigma_a = 31,5$ МПа. Надалі збільшення вмісту наповнювача до $q = 0,50...1,00$ мас.ч. призводить до зниження показників адгезійної міцності композиту до $\sigma_a = 28,8...30,8$ МПа. Вважали, що це зумовлено тим, що конформація фітинової кислоти є стерично стабільною та має одну осьову та п'ять екваторіальних груп. За взаємодії під час структуроутворення композиту може відбуватися змінювання конформації, в результаті чого створюються п'ять осьових груп і одна екваторіальна група. Подібне перетворення відбувається з функціональними групами за атомів фосфору, оскільки такі групи утворюють «хелатуючу клітку», стабілізовану катіонами, що сприяє кристалізації фітинової кислоти в міо-конформації. Це забезпечує активну міжфазову взаємодію груп фітинової кислоти та гідроксильними групами епоксидної смоли, що призводить до підвищення ступеня зшивання матриці та показників її адгезійної міцності.

Додатково досліджували фізико-механічні властивості модифікованих епоксидних композитів. Показано (рис.2,б), що руйнівні напруження для епоксидної матриці становлять $\sigma_{32} = 48,0$ МПа. Введення часточок наповнювача за вмістом $q = 0,25$ мас.ч. призводить до суттєвого збільшення показників даної характеристики, адже руйнівні напруження зростають у 1,7 разів (від $\sigma_{32} = 48,0$ МПа до $\sigma_{32} = 80,3$ МПа). Надалі збільшення вмісту наповнювача до $q = 0,50...1,00$ мас.ч. зумовлює незначне погіршення когезійної міцності матеріалів, оскільки руйнівні напруження за згинанням становлять $\sigma_{32} = 76,4...80,3$ МПа. Окрім того, за результатами досліджень модуля пружності розроблених матеріалів встановлено, що введення додань практично не впливає на показники даної характеристики матеріалів, оскільки модуль пружності епоксидних матеріалів залишається на рівні показника епоксидної матриці, що становить $E = 2,8$ МПа (рис. 2,в).

Перспективним з точки зору впровадження розроблених матеріалів у транспортній галузі є їх поліпшені показники міцності за ударом. Тому вважали за необхідне виконання досліджень ударної в'язкості епоксидних композитів з вибраним наповнювачем. Експериментально встановлено (рис. 2, г), що для епоксидної матриці ударна в'язкість становить $W = 7,4$ кДж/м². Введення активних часточок наповнювача за вмістом $q = 0,25$ мас.ч. забезпечує збільшення міцності композиту за ударом у 1,5 разів (від $W = 7,4$ кДж/м² для вихідної матриці до $W = 10,9$ кДж/м²). Несуттєве зменшення ударної в'язкості КМ виявлено за збільшення вмісту додавання. Зокрема, під час введення до епоксидного олігомера часточок ФК у кількості $q = 0,50 \dots 1,00$ мас.ч. формуються матеріали, які відзначаються наступними показниками ударної в'язкості – $W = 10,3 \dots 10,5$ кДж/м².

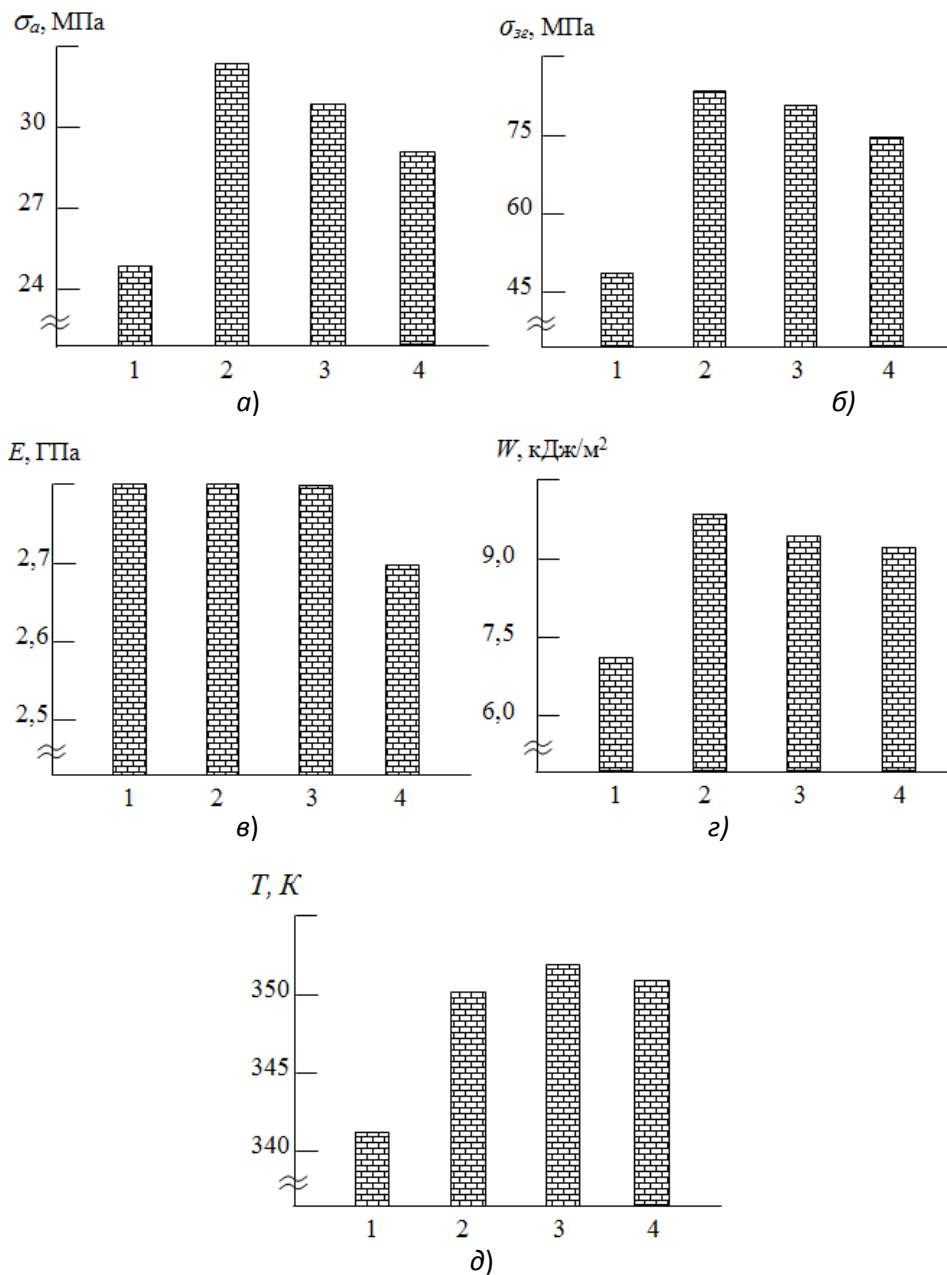


Рисунок 2 – Фізико-механічні властивості та теплостійкість модифікованих композитів залежно від вмісту фітинової кислоти: 1 - епоксидна матриця (контрольний зразок); 2 - 0,25 мас.ч.; 3 - 0,50 мас.ч.; 4 - 1,00 мас.ч. а) адгезійна міцність за відриванням, σ_a , МПа; б) руйнівні напруження за згинанням, $\sigma_{зr}$, МПа; в) модуль пружності за згинанням, E , ГПа; г) ударна в'язкість, W , кДж/м²; д) теплостійкість, T , К

Епоксидні покриття чи об'єкти можна застосовувати для відновлення деталей, які піддають експлуатації за підвищеної температури, тому важливим та актуальним є дослідження їх теплофізичних властивостей, зокрема теплостійкості. Виходячи з цього, на завершальному етапі аналізували показники теплостійкості (за Мартенсом) композиту залежно від кількості фітинової кислоти. Встановлено (рис. 2, д), що теплостійкість епоксидної матриці становить $T = 341$ К. Введення часточок наповнювача, незалежно від вмісту забезпечує підвищення теплостійкості матеріалів до $T = 350 \dots 352$ К. Можна констатувати, що фітинову кислоту можна використовувати за незначного вмісту у епоксидних композитах для поліпшення не лише фізико-механічних, але й теплофізичних властивостей матеріалів.

Висновки. Експериментально доведено, що для формування матеріалів з поліпшеними адгезійними та когезійними властивостями необхідно використовувати композицію наступного складу: епоксидний олігомер марки ЕД-20 ($q = 100$ мас.ч.), твердник поліетиленполіамін ПЕПА ($q = 10$ мас.ч.), наповнювач фітинова кислота ($q = 0,25$ мас.ч.). Формування такого матеріалу забезпечує порівняно з вихідною епоксидною матрицею підвищення наступних показників фізико-механічних та теплофізичних властивостей композитів:

- адгезійної міцності – від $\sigma_a = 24,8$ МПа до $\sigma_a = 31,5$ МПа;
- руйнівних напружень при згинанні – від $\sigma_{3z} = 48,0$ МПа до $\sigma_{3z} = 80,3$ МПа;
- ударної в'язкості – від $W = 7,4$ кДж/м² до $W = 10,9$ кДж/м²;
- теплостійкості (за Мартенсом) – від $T = 341$ К до $T = 350$ К.

Слід зазначити, що модуль пружності такого матеріалу не змінюється порівняно з вихідною епоксидною матрицею та становить $E = 2,8$ ГПа. Одержаний композит доцільно використовувати для відновлення засобів транспорту, які експлуатують за звичайної та підвищеної температури.

Бібліобліографічний перелік

1. Buketov A. V., Zinchenko D. O., Smetankin S. O. Nanommodified dispersed particles- and synthetic fibers-filled epoxy composite materials for the metal-polymer tribosystems of transport vehicles *Nanomechanics Science and Technology*. 2017. Vol. 8. Pp. 41-54.
2. Buketov A., Maruschak P., Sapronov O. Enhancing performance characteristics of equipment of sea and river transport by using epoxy composites. *Transport*. 2016. Vol. 31(3). Pp. 333-342.
3. Sizonenko O., Baglyuk G., Torpakov A. Variation in the particle size of Fe–Ti–B₄C powders induced by high-voltage electrical discharge / *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2012. Vol. 51, No. 3. Pp. 129-136.
4. Method of preparation of blend for poroshka titana aluminium matrix / O. Syzonenko, E. Sheregii, S. Prokhorenko etc. *Composites by high voltage electric discharge. Machines. Technologies. Materials*. 2017. Vol. 11, No. 4. Pp. 171-173.
5. Сизоненко О. Н., Трегуб В. А., Тафтай Э. И. Моделирование и анализ электроразрядных процессов в слое порошка титана в керосине *Вісник українського матеріалознавчого товариства*. Київ. 2014. Вип. 7. С. 55-61.

References

1. Buketov A. V. Zinchenko D. O., Smetankin S. O. Nanommodified dispersed particles- and synthetic fibers-filled epoxy composite materials for the metal-polymer tribosystems of transport vehicles. *Nanomechanics Science and Technology*. 2017. vol. 8. pp. 41-54.
2. Buketov A., Maruschak P., Sapronov O.. Enhancing performance characteristics of equipment of sea and river transport by using epoxy composites. *Transport*. 2016. vol. 31(3). pp. 333-342.
3. Sizonenko O, Baglyuk G., Torpakov A. Variation in the particle size of Fe–Ti–B₄C powders induced by high-voltage electrical discharge. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2012. vol. 51, no. 3. pp. 129-136.

4. Syzonenko O. Sheregii E., Prokhorenko S. Method of preparation of blend for aluminium matrix. *Composites by high voltage electric discharge. Machines. Technologies. Materials*. 2017. vol. 11, no. 4. pp. 171-173.
5. Sizonenko O. N., Tregub V. A., Taftay E. I. Modelirovanie i analiz elektrorazryadnykh prozessov v sloe poroshka titana v kerosine / *Visnyk Ukrainського materialoznavchogo tovarystva*. Kyiv, 2014. vol. 7. pp. 55-61.

Chernyavska Tatiana, postgraduate, Kherson state sea academy, c. Kherson.

PROPERTIES OF EPOXY COMPOSITES, IMPREGNATED BY PHYTIC ACID

Epoxy diane oligomer ED-20, polyethylene polyamine PEPA hardener and microdispersed particles of phytic acid were used to form composite materials and protective coatings for the transport industry. It is important to improve the properties of materials designed to increase the reliability and repair of vehicles, is the use of chemically active to the interfacial interaction of dispersed fillers. In this regard, it is interesting to use as a modifying additive dispersed particles of phytic acid. Phytic acid is an organic environmentally friendly product, active in physico-chemical interaction with organic and synthetic substances, which will improve the mechanical and thermophysical properties of protective coatings. It was believed that due to the activity of the surface of the particles and their slight dispersion ($d = 8... 10 \mu\text{m}$) it is advisable to introduce into the epoxy oligomer additive at homeopathic content (in the amount of 0.25...1.00 parts by weight per 100 parts by weight of epoxy oligomer ED-20). The dependence of the microdispersed powder content on the adhesive, physical and mechanical properties and heat resistance of epoxy composites has been studied. It is proved that for the formation of a composite material or protective coating with improved adhesion and cohesion properties, the optimal content of particles is 0.25 wt. h. per 100 parts by weight epoxy oligomer ED-20. Such materials are characterized by increased mechanical strength and the ability to withstand static and shock loads, as their properties are significantly increased compared to the properties of the matrix material. The results of experimental studies of the physical and mechanical properties of composite materials are in good agreement with the results of tests of samples with adhesive characteristics, which indicates their reliability.

Стаття надійшла: 02.11.2020 р.

УДК 621.82:669-147

DOI <https://doi.org/10.26661/2071-3789-2020-1-11>

Полещук Валентин Михайлович, кандидат технічних наук, виконавчий директор, Асоціація наукових і проектно-конструкторських організацій гірничо-металургійного комплексу України, Дніпро. ORCID: 0000-0002-5906-6042

Бровкін Володимир Леонідович, кандидат технічних наук, доцент, Національна металургійна академія України, Дніпро. ORCID: 0000-0002-2925-7091

Радченко Юрій Миколайович, кандидат технічних наук, доцент, Національна металургійна академія України, Дніпро. ORCID: 0000-0002-5055-6707

Воробьова Лілія Олександрівна, кандидат технічних наук, доцент, Національна металургійна академія України, Дніпро. ORCID: 0000-0003-3729-5140

ДВОВИМІРНА ФІЗИЧНА МОДЕЛЬ ПРАВЛЕННЯ БЕЗПЕРЕРВНОЛИТОГО СЛЯБА КРИВОЛІНІЙНОЇ МБЛЗ

Виконано аналіз схем деформованого стану безперервнолитого зливка під час його переміщення технологічним каналом криволінійних машин безперервного литва заготовок (МБЛЗ). Запропоновано плоску схему деформованого стану кірочки достатньо широкого сляба за наявності рідкої серцевини. Проаналізовано два випадки: з прямолінійним кристалізатором і з радіальним кристалізатором. Наведено формули для розрахунків критичної деформації для зазначених випадків. Результати роботи можна використовувати для створення інженерної методики теплового та механічного розрахунку технологічного каналу криволінійної МБЛЗ.

Ключові слова: безперервне розливання, технологічний канал, фізична модель, деформація правлення, плоска схема, інтервал крихкості, фронт кристалізації, загин, розгин, порушення суцільності

Вступ. Під час проектування МБЛЗ і розробки технологічних режимів основою для ухвалення вирішення є вибрана конструкторами та технологами фізична модель деформованого стану безперервнолитого сляба за проходженням ним технологічного каналу. Основну масу публікацій присвячено різним аспектам теорії та практики безперервного розливання у плані забезпечення необхідної якості готової продукції. В той же час, складність об'єкту дослідження та зумовлені цим, спрощення фізичної моделі деформованого стану неперервнолитого зливка призводять до зниження якості одержаних результатів, а у деяких випадках до спотворення фізичної моделі процесу [1-4].

Так, у публікації ПО «Уралмаш» [2] відзначається, що « результати розрахунків . показують широкий розкид значень прогину кірки (відмінність в 50...100 разів) для одних і тих же початкових даних». Іншим свідченням низького рівня фізичних моделей деформованого стану, що традиційно використовують, є значна кількість емпіричних формул для оцінювання впливу на якість готової продукції різних чинників, зумовлених конструктивними рішеннями або технологічними параметрами [3].

Узагальнюючи значну частину накопиченого дослідниками досвіду побудови фізичної моделі деформованого стану безперервнолитого зливка, що частково закристалізовувався, за проходженням ним криволінійній частині технологічного каналу МБЛЗ можна припустити, що головною причиною низького рівня відповідності результатів моделювання практичним результатам є невідповідність вибраної моделі реальному процесу [1].

Для механіки суцільного середовища розрізняють три схеми фізичної моделі деформованого стану об'єкту, що досліджують: лінійну, плоску та об'ємну [5]. За переважної більшості фізична модель процесу деформування безперервнолитого зливка в технологічному каналі МБЛЗ побудовано за лінійною схемою. При цьому як домінуючу лінію дослідники призначають лінію поверхні кірки або, найчастіше, лінію фронту кристалізації

[2,3,6,7]. Слід відмітити, що ні в одній з публікацій немає обґрунтування легітимності вибирання лінійної схеми деформованого стану під час аналізу варіантів конструкторських вирішень технологічного каналу МБЛЗ.

Мета роботи. Кінцевою метою даної роботи є виявлення в суцільному тілі безперервнолитого зливка критичних зон, де інтенсивність деформації є близькою або перевищує характеристики його другого граничного стану (умова Сен-Венана):

$$\varepsilon \leq [\varepsilon], \quad (1)$$

де ε – значення відносної деформації матеріальної частки, що досліджують; $[\varepsilon]$ – показник граничної пластичності матеріалу, що деформується.

Методика виконання досліджень деформованого стану зливка. Для опису й аналізу деформованого стану зливка за його переміщенням технологічним каналом криволінійної МБЛЗ використовуємо аналітичний апарат механіки суцільного середовища, де базовими є [5]:

- феноменологічний підхід, який припускає, що всяке суцільне тіло складається з матеріальних часток, що зберігають його основні властивості;
- опис деформації суцільного середовища у переміщеннях матеріальних часток, не удаючись до припущення про їх мализну;
- використання понять про перший і другий граничний стан під час оцінювання інтенсивності деформованого стану та здатності дослідженого матеріалу деформуватися без порушення суцільності;
- використання як показник величини деформації «показника Коши», що не має властивості адитивності.

Для виявлення оптимального варіанту схеми деформованого стану для фізичної моделі правлення достатньо звернутися до умови Сен-Венана. Дійсно, положення шуканої зони деформації, де висока інтенсивність деформації поєднується з низькою здатністю металу пластично деформуватися без руйнування, співпадає з положенням подовжньої площини, що є перпендикулярною до поверхні великої грані сляба. Логічне обґрунтування цьому положенню наведено у багатьох публікаціях [2,3].

Таким чином, під час побудови фізичної моделі правлення виходитимемо із змінювання конфігурації траєкторій матеріальних часток, що утворилися на фронті кристалізації та переміщуються індивідуальними траєкторіями в площині, яка є перпендикулярною до великої грані сляба у середині її ширини. Фронт кристалізації є умовною лінією, що проходить на межі між рідкою та твердою субстанціями сталі на початковий період переміщення сляба траєкторією технологічного каналу. Збільшення товщини кірки за часом відбувається під час охолодження кірки. Показник значення відносної деформації кожної i -ої матеріальної частки на момент її фіксації на лінії фронту кристалізації дорівнює нулю $\varepsilon = 0$. Окрім того, кожна матеріальна частка відповідно до феноменологічного підходу має свою індивідуальну траєкторію переміщення у вибраній системі координат, що є характерною для кожної схеми деформації.

Підсумовуючи все наведене вище можна укласти, що деформація матеріальних часток, що утворюють кірку сляба, відбувається поза лінією фронту кристалізації, а використання моделі осередка деформації з лінією фронту кристалізації, як основного об'єкту дослідження, є неправомірним.

Іншою, суперечливою, з точки зору основ механіки суцільного середовища, фізичною моделлю процесу правлення є модель, де єдиний процес вигину кірок подано у вигляді окремих, незалежних процесів, межі між якими проходять лінією зіткнення поверхні сляба з роликками рольгангов [2,3,6].

Нелегітимність подібної фізичної моделі є очевидною у зв'язку з особливими властивостями формули Коши:

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0}, \quad (2)$$

де L – поточне значення розміру елемента, що деформується; L_0 – початкова величина розміру елемента, якого деформують.

Відомо, що показник інтенсивності деформованого стану Коши не має властивості адитивності, а тому розбиття єдиного процесу деформації на декілька етапів з наступним підсумовуванням часткових результатів не може бути визнано легітимним [5].

Відповідно до наведеної вище мети данного дослідження та критичних зауважень щодо формування фізичної моделі деформованого стану зливка під час розливання, перейдемо до опису плоскої схеми деформованого стану затверділого металу під час правлення, а надалі, і під час випинання. Правлення зумовлено змінюванням кривизни технологічного каналу, а випинання – дією ферростатического тиску рідкої сталі на внутрішню поверхню кірок сляба.

За класифікацією прийнятою у механіці суцільного середовища як правлення, так і випинання відносять до одного виду деформації, а саме – до вигину. Правлення реалізують у вигляді двох, наступних один за одним, видів вигину (загину та розгину) за прямолінійним кристалізатором і деформації розгину – за радіальним кристалізатором. Структура випинання є складнішою та вміщує три цикли вигину від моменту входу до мікроликового проміжку до моменту виходу з нього.

Суттєвою відмінністю процесу вигину під час правлення та випинання є положення нейтральної лінії у тілі зливка. За правленням нейтральна лінія розташована в середині товщини зливка, а за випинанням на відстані $\sim 25...30\%$ від поверхні кірки.

Значущим елементом фізичної моделі деформації під час правлення та випинання є знак деформації, який за лінійної схеми не може бути представленим. Знак «+» присвоєно для деформації розтягування, а знак «-» – для деформації стискування. Небезпечними, з точки зору створення тріщин є деформації розтягування (знак «+»).

Методика дослідження деформації правлення. Послідовно розглянемо особливості розвитку деформованого стану кірок безперервнолитого зливка під час правлення у процесі проходження технологічного каналу криволінійної МБЛЗ. Схему розташування осередків деформації правлення за довжиною технологічного каналу криволінійної МБЛЗ подано на рис. 1.

Наведена фізична модель процесу правлення є плоскою схемою деформованого стану кірок досить широкого сляба у подовжньо-вертикальній площині, що проходить на середині його ширини. Фізична модель складається з двох кірок, які закристалізувалися, розділених рідкою серцевиною, деформація яких визначається конфігурацією технологічного каналу МБЛЗ. На початку та в кінці криволінійної частини технологічного каналу сляб має прямолінійну форму (ділянки I і V). У криволінійній частині обидві кірки піддаються пластичній деформації загибу та розгину (ділянки II і IV). У проміжку між криволінійними ділянками розташовується ділянка III, де кривизна кірок залишається незмінною а, відповідно, відносна деформація кожної i -ої матеріальної частки, що осіла на лінії фронту кристалізації до входу кірки в ділянку III є постійною

$$\varepsilon_i = \text{const} . \quad (3)$$

Сеттевою характеристикою деформованого стану кірок на ділянці технологічного каналу II є знак деформації вигину. Так, кірка з поверхнею більшої кривизни ABA_1B_1 є схильною до деформації стискування (знак «-»), а кірка, що є протилежною до неї, з поверхнею меншої кривизни CDC_1D_1 – деформації розтягування (знак «+»). Нейтральна лінія правки N_nN_n розташована на середині товщини сляба $h_n = 0,5H$, незалежно від відстані до кристалізатора.

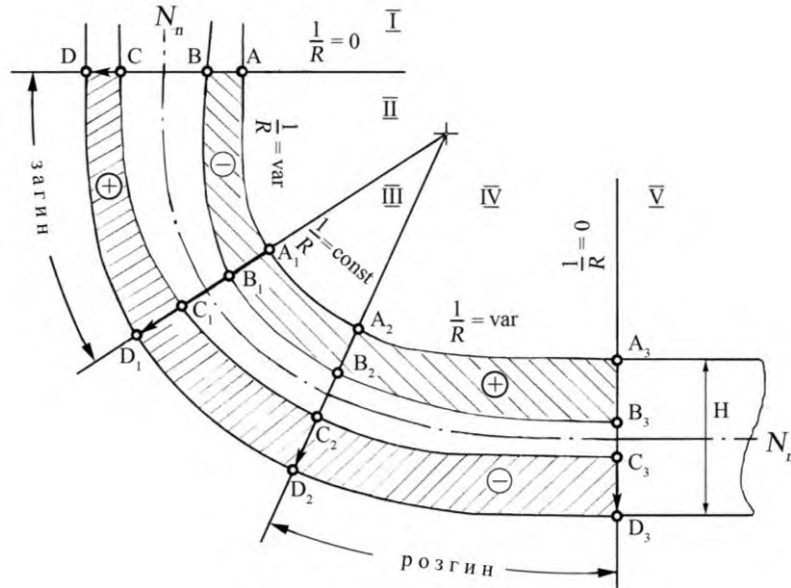
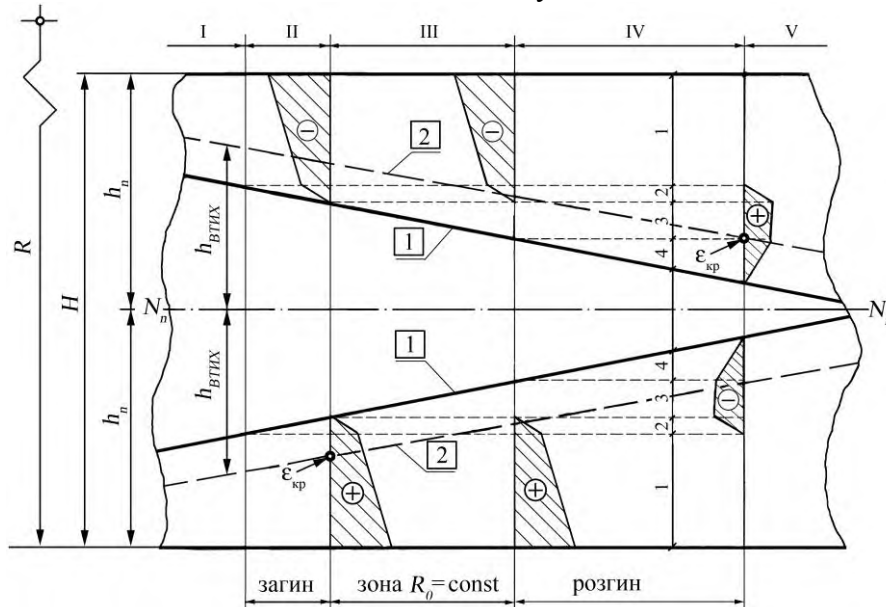


Рисунок 1 – Схема розташування осередків деформації правлення технологічним каналом криво-лінійної МБЛЗ з прямолінійним кристалізатором

По суті деформаційних процесів, що відбуваються на ділянці II, він є осередком деформації загибу. Аналогічно ділянка IV є осередком деформації розгину. У осередку деформації розгину знак деформації відповідної кірки зворотний тому, який був у осередку деформації загибу. Це означає що кірка більшої кривизни (тобто кірка з боку меншого радіусу), яка у осередку деформації загибу піддавалася стискуванню, в осередку деформації розгину піддається розтягуванню. Відповідно в кірці меншої кривизни деформація розтягування у осередку деформації загибу (II ділянка) змінюється в осередку деформації розгину стискуванням (IV ділянка). Наведений опис трансформації деформованого стану кірок є неповним, оскільки не враховує змінювання товщини кірок під час проходження ними криволінійної частини технологічного каналу.

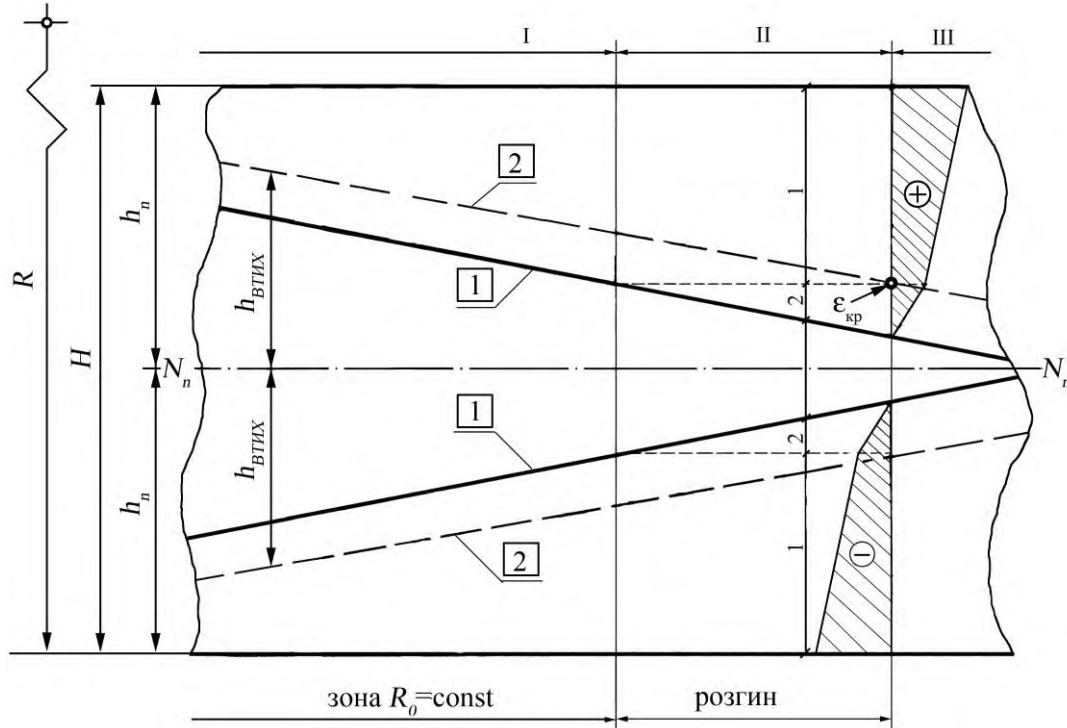


1 - межа фронту кристалізації; 2 - межа ВТИХ (низькотемпературна межа високотемпературного інтервалу крихкості)

Рисунок 2 – Фізична модель деформованого стану кірок сляба під час переміщення технологічним каналом МБЛЗ з прямолінійним кристалізатором

На рис. 2 і 3 наведено динаміку змінювання епюр величини відносної деформації матеріальних часток, що утворюють кірки, з урахуванням збільшення товщини кірки на ділянках II, III, IV з прямолінійним і радіальним кристалізаторами.

Вважаємо, що потрібно особливу увагу приділити аналізу обчислення підсумкового значення показника деформації матеріальних часток обох кірок на лінії сполучення криволінійної та прямолінійної частини технологічного каналу (ділянки IV - V на рис. 2 і ділянки II - III на рис. 3).



1 - межа фронту кристалізації; 2 - межа ВТИХ (низькотемпературна межа високотемпературного інтервалу крихкості)

Рисунок 3 – Фізична модель деформованого стану кірок сляба під час переміщення технологічним каналом МБЛЗ з радіальним кристалізатором:

З рис. 2 витікає, що за висотою кірки можна виділити чотири рівні матеріальні частки (1-4), які відрізняються за часом виникнення їх на лінії фронту кристалізації, а отже і за історією їх деформації. Так матеріальні частки рівня 1 осіли на фронті кристалізації до лінії входу до осередка деформації загину. Підсумкове значення їх деформації на лінії виходу з осередка деформації загину закономірно зменшується у міру збільшення відстані від траєкторії i -х матеріальних часток до поверхні кірки:

$$\varepsilon_i = \frac{h_i}{R_i}, \quad (4)$$

де h_i – відстань від нейтральної лінії $N_n N_n$ до траєкторії i -ої матеріальної частки; R_i – радіус траєкторії i -ої матеріальної частки на виході з осередка деформації загину.

Знак деформації у кірки більшої кривизни («-» стискування), у кірки меншої кривизни («+» розтягування) на виході з осередку деформації загину:

$$\varepsilon_i = \frac{\pm h_i}{(R_0 - h_n) \pm h_i}, \quad (5)$$

де R_0 – базовий радіус МБЛЗ, в цій роботі віднесений до зовнішньої поверхні сляба (радіус меншої кривизни); h_n – половина товщини сляба; h_i – відстань від нейтральної лінії N_nN_n до траєкторії i -ої матеріальної частки.

З рис. 2 витікає, що матеріальні частки рівня 2 з'явилися у складі кірки під час проходження кірки осередком деформації загибу і мають різну тривалість деформації. Абсолютна величина деформації часток рівня 2 зменшується від мінімального значення рівня 1 до нуля у матеріальній частки, що утворилася на перетині кордону ділянки II і лінії фронту кристалізації.

На всьому протязі ділянки III значення деформації всіх матеріальних часток 1 і 2 рівнів залишається незмінним, а матеріальних часток, що утворилися на рівні 3 – дорівнює нулю.

На завершуючому етапі проходження криволінійної частини технологчного каналу (ділянка IV) кірки зливка піддаються складній деформації, зумовленої збільшенням товщини кірок і поєднанням в єдиному процесі деформацій різних знаків «+» і «-».

Як результат, на рівні 1 у кінці ділянки IV у кірці більшої кривизни деформація розтягування повністю компенсує деформацію стискування, зафіксовану у кінці ділянки II. Максимальне значення величини підсумкової деформації розтягування, – на стику криволінійної і прямолінійної частини технологічного каналу, – фіксується на межі 2 і 3 рівнів.

Динаміка змінювання інтенсивності деформації у кірці меншої кривизни є аналогічною динаміці в кірці більшої кривизни. Проте на всіх етапах деформації кірки меншої кривизни знак деформації є зворотним знаку деформації кірки більшої кривизни.

Аналіз плоскої схеми деформованого стану під час правлення на МБЛЗ з прямолінійним кристалізатором дозволяє виділити дві критичні зони дії деформації розтягування, де ймовірність порушення суцільності кірок є максимальною. У кірці більшої кривизни критична ситуація є можливою у кінці IV ділянки в районі межі рівнів 3 і 4, якщо траєкторії матеріальних часток проходять у зоні високотемпературного інтервалу крихкості (ВТИХ). Аналогічна ситуація складається і в кірці меншої кривизни, але у кінці II ділянки на рівнях 1 і 2, де траєкторії матеріальних часток проходять у зоні ВТИХ (рис. 2).

Під час аналізу деформованого стану кірок зливка в технологічному каналі з радіальним кристалізатором слід враховувати змінювання у формі криволінійної частини технологічного каналу, де відсутньою є ділянка загибу (рис. 3). В цьому разі критична ситуація, зумовлена деформацією розтягування, можлива тільки на виході з осередку деформації розгибу в точці перетину лінії виходу з осередку деформації з лінією низькотемпературної межі ВТИХ.

Значення показника відносної деформації у критичних зонах можна визначити, наслідуючи принципи механіки суцільного середовища та схеми на рис. 2 і 3.

Для технологічного каналу з прямолінійним кристалізатором (рис. 2) показник відносної деформації розтягування (+) у критичних зонах ВТИХ на межі II і III ділянок (з боку затверділої кірки більшого радіусу) можна обчислити за формулою (4):

$$\varepsilon_{кр,1}^{прямой} = \frac{h_{ВТИХ}}{(R_0 - h_n) + h_{ВТИХ}}, \quad (6)$$

де $h_{ВТИХ}$ – відстань від нейтральної лінії N_nN_n до низькотемпературної межі ВТИХ в кірці на межі II і III ділянок; h_n – половина товщини сляба.

Аналогічно визначається відносна деформація розтягування (+) в критичній зоні ВТИХ на межі IV і V ділянок (з боку затверділої кірки меншого радіусу)

$$\varepsilon_{кр,1}^{прямой} = \frac{h_{ВТИХ}}{(R_0 - h_n) - h_{ВТИХ}}, \quad (7)$$

де $h_{ВТИХ}$ – відстань від нейтральної лінії $N_n N_n$ до низькотемпературної межі ВТИХ у кірці більшої кривизни на межі IV і V ділянок.

Керуючись тими ж принципами для технологічного каналу з радіальним кристалізатором (рис. 3) показник відносної деформації в критичній зоні ВТИХ осередку деформації розгину на межі II і III ділянок (з боку затверділої кірки меншого радіусу) можна вчислити за тією же формулою (7)

$$\varepsilon_{кр.1}^{радиал} = \frac{h_{ВТИХ}}{(R_0 - h_n) - h_{ВТИХ}}, \quad (8)$$

де $h_{ВТИХ}$ – відстань від нейтральної лінії $N_n N_n$ до низькотемпературної межі ВТИХ в кірці більшої кривизни на межі II і III ділянок (рис. 3).

Найбільш висока ймовірність порушення суцільності тіла кірок спостерігається на тих критичних ділянках, де значення деформації розтягування в межах високотемпературного інтервалу крихкості (ВТИХ) перевищує гранично допустиму величину.

Висновки.

1. Запропоновано двовимірну схему моделі деформованого стану частин (кірок) сляба, які закристалізувалися, що переміщується криволінійним технологічним каналом МНЛЗ, де розглядають деформація правлення у двох варіантах: з прямолінійним і радіальним кристалізаторами.

2. Деформація правлення в кінці криволінійної ділянки технологічного каналу з прямолінійним кристалізатором є урівноваженою тільки в тій частині кірки, яка утворилася до входу в криволінійну ділянку технологічного каналу. Подовжня деформація часток, що утворилися в процесі переміщення зливка щодо криволінійної частини технологічного каналу, не урівноважена частково або повністю та залишається в тілі зливка.

3. Деформація правлення у технологічному каналі з радіальним кристалізатором зумовлена розгином зливка під час переходу його до прямолінійної зони. У такому варіанті деформації розтягування піддається тільки кірка більшої кривизни, а місце можливого порушення суцільності кірки знаходиться на перетині ліній виходу з осередку деформації розгину та межі високотемпературного інтервалу крихкості (ВТИХ).

Библиографический список

1. Полещук В. М., Бровкин В. Л., Мушенков Ю. А. Анализ физических моделей процесса разгиба слитка в криволинейных МНЛЗ *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2014. № 1. С. 45–51.
2. Карлинский С. Е., Денисов Ю. В. Определение деформации корки непрерывнолитых слябов в роликковой зоне МНЛЗ *Сталь*. 1986. № 8. С. 21-24.
3. Буланов Л. В., Корзунин Л. Г., Парфенов Е. П. Машины непрерывного литья заготовок. Казань : Марат, 2003. 319 с.
4. Нисковских В. М., Карлинский С. Е., Беренов А. Д. Машины непрерывного литья слябовых заготовок. Москва : Metallurgiya, 1991. 271 с.
5. Евстратов В. А. Теория обработки металлов давлением. Харьков : Вища школа, 1981. 248 с.
6. Смирнов А. Н., Гридин С. В., Белобров Ю. Н. Расчет параметров загиба и разгиба непрерывнолитой заготовки для МНЛЗ различной конструкции. *Металл и литье Украины*. 2002. № 12. С. 7-10.
7. Бровман М. Я., Сури́н Е. В., Грузин В. Г. Энергосиловые параметры установок непрерывной разливки металлов /. Москва : Metallurgiya, 1969. 280 с.

References

1. Polyeshchuk V. M., Brovkin V. L., Mushenkov Yu. A. Analiz fizicheskikh modeley protsessa razgiba slitka v krivolineynykh MNLZ *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 2014. no. 1.

pp. 45-51.

2. Karlinskiy S. E., Denisov Yu. V. Opredelenie deformatsii korki nepreryvnolytykh slyabov v rolikovoy zone MNLZ. *Stal'*. 1986. no. 8. pp. 21-24.
3. Bulanov L. V., Korzunin L. G., Parfenov E. P. Mashiny nepreryvnogo lit'ta zagotovok / Kazan' : Marat, 2003. 319 p.
4. Niskovskikh V. M., Karlinskiy S. E., Berenov A. D. Masiny nepreryvnogo lit'ya slyabovykh zagotovok. Moskva : Metallurgiya, 1991. 271 p.
5. Evstratov V. A. Teoriya obrabotki metallov davlniem. Khar'kov : Vyshcha shkola, 1981. 248 p.
6. Smirnov A. N., Gridin S. V., Belobrov Yu. N. Raschet parametrov zagiba i izgiba nepreryvnolitoi zagonovki dlya MNLZ razlichnoy konstruktsii *Mtall i lit'ye Ukrainy*. 2002. no. 12. pp. 7-10.
7. Brovman M. Ya., Surin E. V., Gruzin V. G. Enegosilovye parametry ustanovok nepreryvnoy razlivki metallov, Moskva : Metallurgiya, 1969. 280 p.

Polyeshchuk Valentin, executive director, candidate of technical sciences, association of scientific and design organizations of the mining and metallurgical complex of Ukraine, Dnipro.

Brovkin Vladimir, associate professor, candidate of technical sciences, National metallurgical academy of Ukraine, Dnipro.

Radchenko Yuriy, associate professor, candidate of technical sciences, national metallurgical academy of Ukraine, Dnipro.

Vorobiova Liliia, associate professor, candidate of technical sciences, national metallurgical academy of Ukraine, Dnipro.

TWO-DIMENSIONAL PHYSICAL MODEL OF CURVED CCM CONTINUOUSLY CAST SLAB FLATTENING

Linear configurations of the deformed state of a continuously cast ingot at its movement along a process channel of curved continuous-casting machines (CCMs) were analyzed. The illegitimacy of the majority of assumptions applied in the development of the physical model of deformation for a solidified crust of an ingot was demonstrated. The peculiarities of deformed state development in the solid ingot crust in all sections of the curved part of the process channel were reviewed. A two-dimensional configuration of deformed ingot crust state at flattening is proposed. The configuration is based on basic positions of continuous medium mechanics. It is shown that the two-dimensional configuration adequately shows the peculiarities of the deformed ingot crust state in the sections of maximum deformation at flattening. The physical model considers two surface crusts of a sufficiently wide slab that are separated by a liquid core. The deformation of the crusts is determined by the configuration of the CCM process channel. Two cases are analyzed in the paper: with a straight mould and with a curved mould. Formulas for calculating the ultimate deformation are given for these two cases. The locations of the sections of maximum tensile deformation caused by flattening at slab movement along the process channel of curved CCMs have been determined. Two critical sections of possible ingot fracture have been identified in a CCM with a straight mould. One critical section has been identified in a CCM with a curved mould. The results of work can be applied to develop the engineering practice of thermal and mechanical design of the process channel of a curved CCM.

Стаття надійшла: 17.09.2020 р.

УДК 662.767.2

DOI <https://doi.org/10.26661/2071-3789-2020-1-12>

Коваленко Віктор Леонідович, завідувач кафедри, доктор технічних наук, Запорізький національний університет. ORCID: 0000-0001-5950-4412

Артемчук Віктор Васильович, доктор технічних наук, Запорізький національний університет. ORCID: 0000-0002-6056-534

Левченко Сергій Андрійович, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет. ORCID: 0000-0001-6477-2825

Башлій Сергій Вікторович, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет. ORCID: 0000-0002-6134-4849

ЕКОНОМІЧНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ БІОГАЗОВИХ СУМІШЕЙ В УМОВАХ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

Подано результати розрахунків економічної доцільності використання біогазових технологій у промислових пічних установках. Для оцінки економічної ефективності використання біогазу в умовах діючих промислових підприємств металургійної галузі України і Запорізької області розраховано базові економічні показники переведення типового пічного обладнання на біогазові суміші з різних похідних джерел. Встановлено, що використовувати низькокалорійне паливо в енергетичному обладнанні, з урахуванням його якісних показників, доцільно як окремо, так і в комбінації з традиційними джерелами енергії. Зроблено висновок, що до найбільш придатного в ливарному цеху ПАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь» для підвищити за рахунок використання біогазових технологій, є печі відпалу лиття безперервної дії та конвеєрні рециркуляційні сушила форм виливниць. Наведено розрахунок економічної ефективності переведення пічного обладнання ливарного цеху ПАТ «Запоріжсталь» на використання низькокалорійного біогазового палива.

Ключові слова: нагрівальна піч, біогазова суміш, економічні показники, промислове підприємство, теплота згоряння, енергетична ефективність

Вступ. Основним споживачем енергоресурсів у ливарному виробництві є різноманітне пічне обладнання, яке в достатній кількості використовують у головних технологічних процесах відповідних цехів. Процеси плавлення сталі та чавуну, як правило, забезпечують електротермічні агрегати, тоді як інші процеси теплової обробки матеріалів виконують з використанням пристроїв з топковим принципом спалювання палива, яким є природний газ. Використання альтернативних та відновлюваних джерел енергії, особливо у промисловості, набуває з кожним роком все більшої актуальності. Оскільки, традиційні енергоресурси, що споживають на промислових підприємствах, займають все більшу частку в структурі собівартості продукції через навальне їх дорожчання, впровадження біогазових технологій, в першу чергу, в металургійній галузі та заміщення ними природного газу, як одного з головних видів палива є одним з першочергових завдань. Окрім того, енергозабезпечення термічних та нагрівальних печей як найменш вимогливих з технологічної точки зору до агресивного хімічного складу біогазових сумішей [2-4] може стати шляхом підвищення конкурентоспроможності виробництва через більш низьку вартість біогазу як первинного палива для зазначеного обладнання.

Постановка завдання. Завданням роботи є визначення доцільності, технологічних особливостей та економічної ефективності переведення пічного обладнання металургійної галузі на низькокалорійне біогазове паливо на прикладі ливарного цеху ПАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь».

Головна частина досліджень. Виходячи з наведеної інформації в попередніх дослідженнях можна зазначити, що до найбільш придатного для переведення на біогазове паливо обладнання в ливарному цеху ПАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь» слід віднести печі відпалу лиття безперервної дії та конвеєрні рециркуляційні сушила форм,

що являють собою довгий коридор, де розташовано горизонтальний конвеєр із підвісними етажерками, на які встановлюють вологі форми та стрижні виливниць [5]. Їх середньомісячна продуктивність складає 6500 т. Сушило опалюють природним газом за допомогою тридцяти двох пальників максимальної потужності 18 м³/год. Основні технічні характеристики зазначеного агрегату наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Основні характеристики роботи сушила ЛК-1

Найменування показника	Позначення	Одиниці вимірювання	Значення
Середня витрата природного газу	V_g	м ³ /год.	416,7
Середня витрата повітря	V_n	м ³ /год.	5631
Коефіцієнт витрати повітря	α	м ³ /м ³	1,41
Середня температура димових газів	T_{dg}	К	433
Калорійність природного газу	Q	МДж/м ³	35
Коефіцієнт використання палива	η	МДж/МДж	0,91
Коефіцієнт корисної дії	$ККД$	%	38,9
Питома витрата теплоти на одиницю продукції	g	МДж/т	624,4

Для відпалу відливків значної маси використовують печі безперервної дії, де у шаховому порядку встановлено чотири автоматичні пальники потужністю 14 м³/год. природного газу. Середньомісячна продуктивність печі – 400 т. Для визначення теплотехнічних та технологічних характеристик роботи агрегату за основу прийнято базовий режим його експлуатації, характеристики якого наведено у табл. 2.

Таблиця 2 – Основні характеристики роботи печі відпалу лиття

Найменування показника	Позначення	Одиниці вимірювання	Значення
Середня витрата природного газу	V_g	м ³ /год.	46,16
Середня витрата повітря	V_n	м ³ /год.	930
Коефіцієнт витрати повітря	α	м ³ /м ³	2,12
Середня температура вихідних газів	$T_{в.г.}$	К	543
Калорійність природного газу	Q	МДж/м ³	35
Коефіцієнт використання палива	η	МДж/МДж	0,8
Коефіцієнт корисної дії	$ККД$	%	25,5
Питома витрата теплоти на одиницю продукції	g	МДж/т	740

Розглянуті печі ливарного цеху ПАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь» мають постійну й значну потребу в паливі та спроможні працювати в широкому діапазоні його якості і калорійності [1-2]. Відповідні технологічні та конструктивні особливості даного обладнання вказують на можливість повного або часткового заміщення природного газу біогазом. В дослідженнях щодо використання в таких агрегатах сумішей природного та доменного газів [6] виявлено, що під час збільшення питомих витрат останніх на 20% від номінального значення відзначається суттєве погіршення теплового балансу зазначеного обладнання, що зумовлює зменшення якості сушіння та рециркуляції теплоти пічних газів до критичних показників, що спричинює зменшення продуктивності агрегату або його додаткової конструктивної модернізації.

Форми виливниць, що піддають термічній обробці, виготовляють із сумішей, компоненти яких мають властивість нейтралізувати дію оксиду сірки(IV). До того ж, після просушування їх додатково обробляють у камерах гідроочищення та фарбують, що зводить до мінімуму деструктивний вплив на них агресивних компонентів у продуктах згорання під час спалювання біогазу із підвищеною концентрацією сірководню. Максимально допустима концентрація останнього в паливі для розглянутих агрегатів складає 0,4%. Враховуючі зазначену нейтралізуючу дію компонентів сумішей щодо оксиду сірки(IV), зазначена концентрація сірководню є допустимою та не перевищує граничних значень [7]. Окрім того, в роботі [8] доведено, що під час застосування в таких агрегатах низькокало-

рійних газів, погіршується коефіцієнт використання палива η . Так, за теплотворної спроможності суміші $Q = 16,0 \text{ МДж/м}^3$, коефіцієнт η зменшився приблизно на 15% від базового варіанту ($Q = 35,0 \text{ МДж/м}^3$).

Для обробки біогазу перед спалюванням існують декілька доступних з економічної точки зору методів: його збагачення до достатнього рівня водяною абсорбцією для зменшення концентрації не тільки діоксиду вуглецю, але й сірководню [9], та «рідинне» очищення від сірководню відпрацьованою сульфатною кислотою, що залишається після процесу травлення сталю прокату за умов металургійного підприємства [10]. Також, згідно з роботою [11], максимальній ефективності очищення від сірководню сприятиме застосування додаткового абсорбуючого ефекту від використання аміачної води, яка є побічним продуктом технологічних циклів комбінату.

Тож, із проведеного аналізу стає очевидним, що для зазначених агрегатів ливарного виробництва ПАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь» під час переведення їх на біогазове паливо, потрібно реалізувати різні перелічені заходи. Сушила, зокрема, потребують заміни пальникових пристроїв, а печі відпалу лиття - глибокої обробки біогазу перед спаленням для підвищення його якості та калорійності.

В місті Запоріжжя існують два потенційні джерела виробництва біогазу, які знаходяться на допустимій відстані від ПАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь». Полігон ТБО № 1 із середньою продуктивністю виходу смітничкового біогазу в обсязі 1000...1500 $\text{м}^3/\text{год}$. знаходиться на відстані 8 км від території підприємства. Проектом зі збирання біогазу з цього звалища, навіть, не передбачено енергетичне використання отриманого палива, тому його спалюють на факельній свічці, а продукти горіння очищують від надмірної концентрації сірки(IV). При цьому такий обсяг виробництва біогазу міг би повністю чи частково забезпечити енергетичні потреби розглянутих печей ливарного цеху зазначеного підприємства.

Виробничо-тваринницький комплекс «Запоріжжя», який спеціалізується на виготовленні продукції з свинини використовує для утилізації власних відходів технології їх біоконверсії з отриманням біогазу. Продуктивність останньої в середньому складає 250 $\text{м}^3/\text{год}$. біогазу, що в повному обсязі покриває потреби підприємства в тепловій енергії. Для цього неочищений біогаз спалюють у спеціально спроектованих котлах, а його решту в обсязі до 40% (100 $\text{м}^3/\text{год}$.) також утилізують на факельній свічці. Підприємство знаходиться на відстані 5 км від ПАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь», що дає змогу для постачання йому цього залишку палива.

У випадку промислового використання біогазу із зазначених джерел, необхідну кількість палива із них можна постачати на підприємство спеціально побудованою мережею трубопроводів із поліетилену високої щільності, прокладених у ґрунті. Її вартість в загальній мірі буде визначати економічну доцільність впровадження проектів використання біогазових технологій на зазначеному підприємстві.

Отже, як приклад, за умов ливарного цеху ПАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь» для двох агрегатів, а саме: печі відпалу лиття безперервної дії ($\omega_{не} = 46,16 \text{ м}^3/\text{год}$.) та конвеєрного рециркуляційного сушила форм виливниць ($\omega_{не} = 416,7 \text{ м}^3/\text{год}$.) визначено економічну доцільність їх переведення на біогазове паливо. При цьому, дані щодо вартості та калорійності природного газу прийнято згідно з роботою [12].

За альтернативне паливо розглядають біогазову суміш з відходів свиного господарства з типовим складом [13,14]: $A_{мер} = 65\% \text{ CH}_4^{мер} + 32,5\% \text{ CO}_2^{мер} + 1,2\% \text{ H}_2\text{S}^{мер} + 0,2\% \text{ N}_2^{мер} + 1,0\% \text{ H}_2^{мер} + 0,1\% \text{ O}_2^{мер}$. Прийнята початкова вартість ресурсу: $B_{мер} = 2,9 \text{ грн./м}^3$. Для встановлення технологічних та екологічних критеріїв можливості використання біогазових технологій було визначено, що в печах можна спалювати паливо різної калорійності із максимально-допустимою концентрацією сірководню $\text{H}_2\text{S}^{об} \leq 0,3\%$. В табл. 3 наведено тех-

нічні та технологічні показники відповідного обладнання, що передбачають перевести на біогазове паливо.

Таблиця 3 – Показники технологічних та екологічних особливостей відповідного обладнання щодо переведення його на біогаз

Характеристика	Конвеєрне рециркуляційне сушило ЛК-1	Піч відпалу лиття
Витрата природного газу	$\omega_{nz} = 416,7 \text{ м}^3/\text{год.}$	$\omega_{nz} = 46,16 \text{ м}^3/\text{год.}$
Калорійність природного газу	$Q_{nz} = 35 \text{ МДж/м}^3$	
Режим роботи	Безперервної дії ($N_y = 8760 \text{ год/рік}$)	
Коефіцієнт використання палива	$\eta_{nz} = 0,91$ $\eta_{bz} = \eta_{cm} = \eta_{nz}$	$\eta_{nz} = 0,80$ $\eta_{cm} = \eta_{nz} \cdot (0,0078 \cdot Q_{cm} + 0,7236)$
Коефіцієнт надлишку повітря	$\alpha_{nz}^{nov} = 1,41$	$\alpha_{nz}^{nov} = 2,12$
	$\alpha_{cm}^{nov} = \alpha_{nz}^{nov} \cdot (1 + 0,01 \cdot (0,005 \cdot (C O_2^{cm} + N_2^{cm}))^2 + 0,45 \cdot (C O_2^{cm} + N_2^{cm}))$	
Технологічні вимоги	$\alpha_{cm}^{nov} \cdot \omega_{cm}^{nov} + \omega_{cm} \leq$ $\leq 1,2 \cdot \alpha_{nz}^{nov} \cdot \omega_{nz}^{nov} + \omega_{nz}$	-
Екологічні вимоги	$H_2S_{cm} \leq 0,5\%$	$H_2S_{cm} \leq 0,2\%$
	$V_{SO_2} < 500 \text{ мг/м}^3$	
Умови модернізації палників	$N_n^{mod} = 32,$ якщо $Q_{cm} < 28 \text{ МДж/м}^3$	$N_n^{mod} = 2,$ якщо $C O_2^{cm} + N_2^{cm} > 12\%$

Кінцеві результати визначення доцільності використання біогазових технологій для підвищення енергетичної ефективності розглянутих печей наведено в табл. 4.

Таблиця 4 – Головні техніко-економічні показники проекту використання біогазових технологій в ливарному виробництві

Показник	Одиниця вимірювання	Піч відпалу лиття	Конвеєрне рециркуляційне сушило форм виливниць
Z_{nz}	тис. грн./рік	3 625,627	32 729,613
Z_{bz}		2 679,089	22064,332
$\omega_{мер}^u$	м^3	75,74	630,92
$A_{об} \cdot$ $CH_4^{об}$ $CO_2^{об}$ $H_2S^{об}$ $N_2^{об}$ $H_2^{об}$ $O_2^{об}$	%	68,43 29,95 0,256 0,21 1,05 0,09	77,09 21,10 0,299 0,24 1,186 0,09
$K_{зб}$	тис. грн.	671,673	12194,334
$K_{оч}$		2178,179	8647,981
K_{mod}		1084,303	10238,447
$K_{ін}$		1120	4100
E_n	-	0,15	0,15
$C_{заг}^{bz}$	тис. грн./рік	2 072,164	17 240,553
E		1 423,724	19 005,726

Хімічні складові смітничого біогазу з полігону ТПВ м. Запоріжжя такі:
 $A_{мер} = 45\% C H_4^{мер} + 45\% C O_2^{мер} + 0,7\% H_2 S^{мер} + 5,2\% N_2^{мер} + 1,4\% H_2^{мер} + 2,7\% O_2^{мер}$.

Із застосуванням запропонованого в роботі [1] алгоритму побудовано графіки (рис. 1 та 2) змінювання $Z_{бг}$ для кожного випадку використання біогазових технологій залежно від x_1 та x_2 .

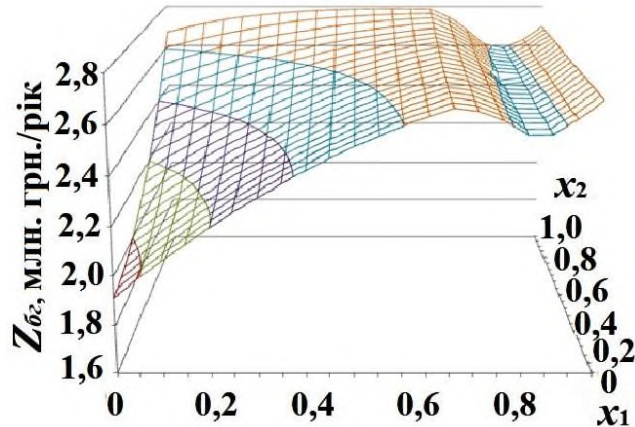


Рисунок 1 – Сумарні приведені річні витрати за використанням біогазу для спалювання в печі відпалу лиття

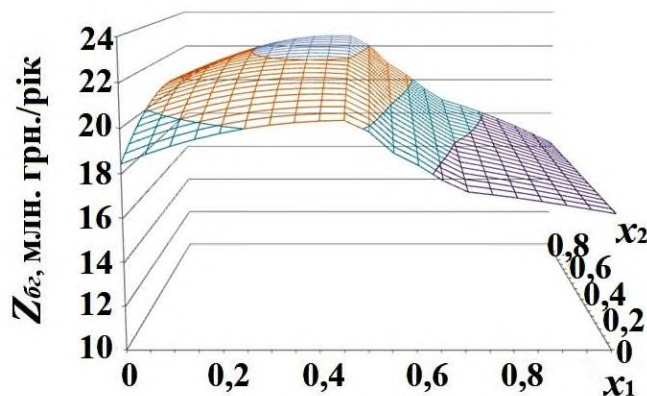


Рисунок 2 – Сумарні приведені річні витрати за використанням біогазу для спалювання в конвеєрному рециркуляційному сушилі форм виливниць

Як видно з рис. 1 і 2, з економічної точки зору біогаз вигідно використовувати в усіх можливих випадках, причому умови найефективнішого його застосування для кожної печі є різними. Функція $Z_{бг} = f(x_1, x_2)$ представляє собою поверхню з неявно вираженою формою. Оптимальне її значення за результатами розрахунків на графіках чітко не прослідковується, що вказує на більший вплив технологічних та екологічних факторів, ніж економічних на визначення умов ефективного використання біогазових технологій. Хоча з технологічної точки зору потреба у збагаченні біогазової суміші не висувалась, проте з економічної - підвищення якості біогазу виявилось необхідним для досягнення максимального економічного ефекту під час заміщення природного газу.

Висновки. Розрахунки показали, що річний економічний ефект під час використання біогазових технологій для печі відпалу лиття та конвеєрного рециркуляційного сушила форм виливниць за умов ПАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь» становить 1,42 та 19,01 млн. грн., відповідно. Такі високі показники підтверджують можливість та доцільність використання біогазових технологій у промисловості.

Бібліографічний список

1. Коваленко В. Л., Сердюк К. М., Кузнецова А. В. Алгоритм визначення ефективності використання біогазових сумішей в промислових пічних установках. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2019. № 17. С. 72-80.
2. Качан Ю. Г., Коваленко В. Л., Аносов Д. О. Щодо доцільності та ефективності застосування біогазових технологій в умовах металургійних підприємств. *Металургія : наукові праці Запорізької державної інженерної академії*. Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2015. Вип. 2 (34). С. 106-110.
3. Лучшие методы реализации биогазовых энергетических проектов ТБО Режим доступа: <http://www.uabio.org/img/files/docs/toolsres-lfg-ru.pdf>. Загл. с экрана.
4. Сизоненко О. А. Возможность и необходимость реализации стратегий экологического управления на промышленных предприятиях. *Економіка : проблеми теорії та практики : збірник наукових праць Дніпропетровського національного університету*. Дніпропетровськ, 2005. Вип. 204, Т. 1. С. 265-271.
5. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України : веб сайт. URL: <http://www.sae.gov.ua/uk/news/2270> (дата звернення: 12. 10. 2016).
6. Использование биологического топлива для нагрева металла в металлургических печах. : веб-сайт. URL: <http://ea.dgtu.donetsk.ua:8080/jspui/handle/123456789/26550> (дата звернення 08.10.2016).
7. Про охорону навколишнього природного середовища : Закон України від 26 черн. 1991 р. № 41. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1264-12> (дата звернення 08.02.2017).
8. Мастрюков Б. С. Теория, конструкции и расчеты металлургических печей : учебник Т. 2. Москва : Металлургия, 1986. 376 с.
9. Куріс Ю. В., Червоний І. Ф. Біогазові технології. Енергетичні та екологічні аспекти : монографія. Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2010. 488 с.
10. Ковалишин Б. М. Підвищення енергоефективності паливних установок через активацію молекул-реагентів реакції горіння. *Наукові вісті НТУУ КПІ*. 2011. № 1. С. 136-139.
11. Шестерникова Р. Е. Результаты опытно-промышленных испытаний технологии очистки газа от сероводорода водными растворами сульфата железа и аммиака. *Нефтепромышленное дело*. 2007. № 7. С. 54-56.
12. Гелетуха Г. Г., Кучерук П. П., Матвеев Ю. Б. Перспективи виробництва та використання біогазу в Україні : Аналітична записка. № 11. Київ, Біоенергетична асоціація України, 2014. 42 с.
13. Баадер В. Биогаз : теория и практика / пер. с нем. Москва : Колос, 1982. 149 с.
14. Частухин В. И. Топливо и теория горения : учебное пособие. Киев : Вища школа, 1989. 233 с.

References

1. Kovalenko V. L., Serdyuk K. M., Kuznetsova A. V. Alforitm vyznachennya efettyvnosti vykorystannya biogazovykh sumishey v promyslobykh pechnykh ustanovkakh. *Elektromagnitna sumisnist' ta bezpeka na zaliznychnomu transpoti*. 2019. no. 17. pp. 72-80.
2. Kachan Yu. G., Kovalenko V. L., Anosov D. O. Shchodo dotsil'nosti ta efektyvnosti zastosuvannya biogazovykh technology v umovakh metalurgijnykh predpriumstv. *Metalurgiya : naukovy pratsi Zaporiz'koy derzhavnoy inzhenernoy akademii*. Zaporizhzhya : RVV ZDIA, 2015. vol. 2 (34). pp. 106-110.
3. Luchshie metody realizatsii biogazovykh energeticheskikh proektov TBO Rezhim dostupu: <http://www.uabio.org/img/files/docs/toolsres-lfg-ru.pdf>. Zagl. s ekrana.
4. Sizonenko O. A. Vozmohnost' I neeobkhodimost' realizatsii strategiy ekologicheskogo upravleniya na promyshlehhyykh prdpriyatiyakh. *Ekonomika : problemy teorii ta praktyky : zbirnyk naukovykh prats' Dnipropetrovs'kogo natsional'nogo univertsytetu*. Dnipropetrovs'k, 2005. t. 1. vol. 204. pp. 265-271.
5. Derzhavne agntstvo z energoefektyvnosti ta ehergozberezhzhya Ukraiuy : veb-sajt. URL: <http://www.sae.gov.ua/uk/news/2270> (data zvernehhya: 12. 10. 2016).
6. Ispol'zovanie biologicheskogo topliva dlya nagreva metalla v metallurgicheskikh pechakh. : veb-sajt. URL: <http://ea.dgtu.donetsk.ua:8080/jspui/handle/123456789/26550> (data zvernennya 08.10.2016).

7. Pro okhoronyu navkolyshn'ogo prurodnogo seredovyshcha : Zakon Ukrainy vid 26 cherv. 1991. no. 41. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1264-12> (data zvernennya 08.02.2017).
8. Mastryukov B.S. Teoriya, konstruktzii i raschety metallurgicheskikh pechey : uchebnik t. 2. Moskva : Metallurgiya, 1986. 376 p.
9. Kuris Yu.V., Chervony I. F. Biogazovi tekhnologii. Energetychni ta ekologichni aspekty : monografiya. Zaporizhzhya : RVV ZDIA, 2010. 488 p.
10. Kovalishin B.M. Pidvyshchennya eenergoefektyvnosti palyvnykh ustanovok cherez aktyvatsiyu molekul-reagentiv reaktsii gorinnya. *Naukovi visti NTUU KPI*. 2011. no. 1. pp. 136-139.
11. Shesternikova R.E. Rezul'taty opytно-promyshlen'nykh ispytaniy tekhnologii ochistki gaza ot serovodoroda vodnymi rasvorami sul'fata zheleza i ammiaka. *Nftepromyslovor delo*. 2007. no. 7. pp 54-56.
12. Geletukha G.G., Kucheruk P.P., Matveev Yu.B. Perspektyvy vyrobnyctva ta vukorystannya biogazu v Ukraini : Analitychna zapyska. No. 11. Kyiv, Bioenergetychna asotsiatsiya Ukrainy, 2014. 42 p.
13. Baader V. Biogaz : Teoriya i praktyka / per. z nem. Moskva : Kolos, 1982. 149 p.
14. Chastukhin V. I. Topливо i teoriya goreniya : Uchebnoe posobie. Kiev : Vyscha shkola, 1989. 233 p.

Kovalenko Victor, department head, doctor of technical sciences, Zaporozhe national university.

Artemchuk Victor, professor, doctor of technical sciences, Zaporozhe national university.

Levchenko Sergii, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporozhe national university.

Bashliy Sergii, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporozhe national university.

ECONOMIC AND TECHNOLOGICAL ASPECTS OF THE USE OF BIOGAS MIXTURES IN THE CONDITIONS OF INDUSTRIAL FACILITIES

The results of calculations of economic feasibility of using biogas technologies in industrial furnaces are presented. To assess the economic efficiency of biogas use in the existing industrial enterprises of the metallurgical industry of Ukraine and Zaporizhia region, in particular, the basic economic indicators of conversion of standard furnace equipment to biogas mixtures from different derived sources are calculated. The method based on the proposed calculation and the algorithm presented in work [1], the technical feasibility of using biogas as an alternative fuel for energy supply of thermal and heating furnaces of these enterprises on the example of a real object. It is established that the use of low-calorie fuel in energy equipment, taking into account its quality indicators, it is advisable both separately and in combination with traditional energy sources. Based on the analysis of the existing equipment of the object of study, it was concluded that the most suitable in the foundry of PJSC «Zaporizhstal», whose energy efficiency can be increased through the use of biogas technologies, include continuous annealing furnaces and conveyor recirculating molds. For these units, foundry production when converting them to biogas fuel, it is necessary to implement the following technical measures: the former require replacement of burners to meet the conditions of constant temperature, although they may consume even crude crude biogas, and the latter require deep processing of the latter to improve its quality and caloric content. The calculation of economic efficiency of conversion of the furnace equipment inherent in the metallurgical industry to low-calorie biogas fuel on the example of the foundry of PJSC «Zaporizhstal» is given. Calculations have shown that the annual economic effect is 1.42 and 19.01 million UAH. Per year, respectively, this indicates the feasibility of using biogas technologies in industry.

Стаття надійшла: 06.11.2020 р.

УДК 621.783:681.5]:536.2

DOI <https://doi.org/10.26661/2071-3789-2020-1-13>

Зінченко Володимир Юрійович, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-9464-299X

Іванов Віктор Ілліч, старший науковий співробітник, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0001-8816-3506

Нестеренко Тетяна Миколаївна, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0001-7900-8512

Каюков Юрій Миколайович, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0003-4311-4801

РОЗРОБКА ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ТЕРМІЧНИМИ ПЕЧАМИ

Розроблено імітаційну модель розповсюдження теплоти у пластині безмежної довжини, що нагрівають під термічну обробку із застосуванням пакету прикладних програм «*MatLab 6.5 SP1\7 + Simulink 5/6*». Модель можна використовувати для оцінки розподілу температури у фізично неоднорідних тілах різної конфігурації за умови можливості виділення ізотермічних шарів рівної товщини, а також наявності рівномірного теплообміну з відкритих поверхонь.

Ключові слова: термічні печі, пластина безмежної довжини, розподіл температури, імітаційна модель теплопровідності, розробка, автоматизована система управління

Вступ. Під час поставлення теплових завдань для автоматизованих систем управління термічними печами необхідно заздалегідь вирішити задачу теплопровідності в металі, що нагрівають [1]. У печах камерного типу нагрівання металу під термічну обробку виконують за багатоступінчастими температурно-часовими режимами, що передбачають здійснення періодів нагрівання, ізотермічної витримки й охолодження, які є регламентованими щодо швидкості змінювання температури металу та часу. Реалізація таких режимів є можливою тільки за наявності інформації про динаміку розподілу теплоти в металі, якого нагрівають.

Відсутність інструментальних засобів безпосередньої оцінки теплового стану металу в термічних печах спричинює необхідність застосування математичних моделей, які засновано на використанні класичного диференціального рівняння теплопровідності в частинних похідних. Проте наявність суттєвої залежності теплофізичних властивостей металу від температури [2] призводить до нелінійності рівняння теплопровідності. Наступне аналітичне розв'язання рівняння теплопровідності з використанням спрощуючих припущень супроводжується значними погрішностями під час визначення функції розподілу температури металу за простором і часом. Чисельні методи розв'язання такого рівняння з використанням різницевих схем [3] не дозволяють у загальному вигляді запропонувати рекомендації для вибирання раціональних температурно-часових режимів термічної обробки маловивчених і нових марок сталі. Тому виникає необхідність розробки досить простих і надійних моделей із самонастроюванням під час роботи.

Мета роботи. Завданням досліджень є розробка інженерної моделі теплопровідності, що дозволяє за прискореним часовим режимом розробляти раціональні режими обробки металу з урахуванням змінювання його теплофізичних властивостей, а під час роботи в реальному масштабі часу реалізувати оптимальні температурно-часові режими обробки металу в термічних печах.

Головна частина досліджень. У термічних печах камерного типу, нагріванню під термічну обробку піддають переважно тіла, що є близькими за формою до простих тіл ти-

пу пластина, циліндр або сфера, тепловий стан яких описують за допомогою диференціальних рівнянь теплопровідності.

Відома інженерна модель розповсюдження теплоти в металевих тілах, яку запропоновано Й.Д. Семікіним [4]. Згідно такої моделі масивне тіло, що нагрівають термічно, подають у вигляді n шарів з однаковою температурою та теплофізичними властивостями. За підведенням теплоти до такого тіла відбувається послідовне нагрівання зазначених шарів. Розподіл теплових потоків і температури в тілі на будь-який момент часу залежить від характеру розподілу поверхневого потоку на момент часу, який передує тому, що розглядають. За значної кількості шарів у масивному тілі така інженерна модель наближається до системи, яку безперервно розподілено в просторі. Нагрівання кожного окремого шару математично може бути описано одномірним диференціальним рівнянням теплопровідності.

Розглядають задачу нагрівання під термічну обробку пластини безмежної довжини товщиною $2S$. Приймають, що нагрівання такої пластини є симетричним, тобто між поверхнею пластини та довкіллям має місце однаковий теплообмін з обох боків пластини. Пластину поділяють на n шарів товщиною Δx , температура яких складає відповідно $T_1, T_2 \dots T_n$, а температура нагрівальних газів – $T_{не}$. Початок координат вибирають на поверхні пластини, за $x = S$ поверхня пластини є теплоізолюваною.

Теплові потоки від нагрівальних газів до кладки $q_{не,1}$ та між окремими шарами пластини $q_{i,i+1}$ подають у формі рівняння Ньютона-Рихмана:

$$q_{не,1} = \alpha_{\Sigma} \cdot (T_{не} - T_1); \quad (1)$$

$$q_{i,i+1} = \alpha_{i,i+1} \cdot (T_i - T_{i+1}), \quad (2)$$

де α_{Σ} – сумарний коефіцієнт тепловіддачі від нагрівальних газів конвекцією та випромінюванням, Вт/(м²·К); $q_{i,i+1}$ – тепловий потік від шару i до шару $i+1$, Вт/м²; $\alpha_{i,i+1}$ – коефіцієнт теплопередачі від шару i до шару $i+1$, Вт/(м²·К).

Рівняння миттєвого теплового балансу для першого шару пластини можна подати як:

$$c_m \cdot m_m \frac{dT_1}{d\tau} = \alpha_{\Sigma} \cdot F \cdot (T_{не} - T_1) - \alpha_{1,2} \cdot F \cdot (T_1 - T_2), \quad (3)$$

де c_m – середня теплоємність металу пластини, кДж/(кг·К); m_m – маса металу в пластині, кг; F – площа поверхні пластини, що нагрівають, м²; $\alpha_{1,2}$ – коефіцієнт тепловіддачі від першого шару до другого шару, Вт/(м²·К); τ – час нагрівання, с.

Виконуючи перетворення рівняння (3) та здійснюючи ділення його обох частин на вираз $(\alpha_{\Sigma} + \alpha_{1,2}) \cdot F$, отримують:

$$\frac{\Delta x^2 \cdot \alpha_{1,2}}{\alpha \cdot (\alpha_{\Sigma} + \alpha_{1,2})} \cdot \frac{dT_1}{d\tau} + T_1 = \frac{\alpha_{\Sigma}}{(\alpha_{\Sigma} + \alpha_{1,2})} \cdot T_{не} + \frac{\alpha_{1,2}}{(\alpha_{\Sigma} + \alpha_{1,2})} \cdot T_2. \quad (4)$$

Тоді рівняння миттєвого теплового балансу для i -го шару пластини має вигляд:

$$\frac{\Delta x^2 \cdot \alpha_{i,i+1}}{\alpha \cdot (\alpha_{i-1,i} + \alpha_{i,i+1})} \cdot \frac{dT_i}{d\tau} + T_i = \frac{\alpha_{i-1,i}}{\alpha_{i-1,i} + \alpha_{i,i+1}} T_{i-1} + \frac{\alpha_{i,i+1}}{\alpha_{i-1,i} + \alpha_{i,i+1}} \cdot T_{i+1}. \quad (5)$$

Для спрощення запису рівняння (5) вводять наступні позначення:

$$\theta = \frac{\Delta x^2 \cdot \alpha_{i,i+1}}{\alpha \cdot (\alpha_{i-1,i} + \alpha_{i,i+1})}; \quad k_{i-1,i} = \frac{\alpha_{i-1,i}}{\alpha_{i-1,i} + \alpha_{i,i+1}}; \quad k_{i+1,i} = \frac{\alpha_{i,i+1}}{\alpha_{i-1,i} + \alpha_{i,i+1}} .$$

Отже, для пластини безмежної довжини, що складається з n шарів, можна записати систему рівнянь у вигляді:

$$\begin{aligned} \theta_1 \frac{dT_1}{d\tau} + T_1 &= k_{не,1} \cdot T_{не} + k_{2,1} \cdot T_2 \quad \text{за } T_1(0) = T_1^{ноч}; \\ \theta_i \frac{dT_i}{d\tau} + T_i &= k_{i-1,i} \cdot T_{i-1} + k_{i+1,i} \cdot T_{i+1} \quad \text{за } T_i(0) = T_i^{ноч}; \\ \theta_n \frac{dT_n}{d\tau} + T_n &= k_{n-1,n} \cdot T_{n-1} \quad \text{за } T_n(0) = T_n^{ноч}, \end{aligned} \quad (6)$$

де $i = 1, 2, \dots, n$; $\theta_1, \theta_i \dots \theta_n$ – постійні часу, які визначають динаміку змінювання температури в 1, 2 ... n шарах пластини; $k_{не,1} \dots k_{n-1,n}$ – коефіцієнти теплопередачі між окремими шарами пластини: від першого до n -го шарів; $T_1^{ноч}, T_i^{ноч}, T_n^{ноч}$ – початкова температура першого, i -го і n -го шарів пластини відповідно.

Постійні часу θ залежать від теплофізичних властивостей металу, якого термічно обробляють: коефіцієнта температуропровідності (a), щільності (ρ) і теплоємності (c), а також сумарного коефіцієнта тепловіддачі від нагрівальних газів до металу конвекцією та випромінюванням (α_Σ) і коефіцієнта теплопередачі від i -го шару до $i+1$ -го ($\alpha_{i+1,i}$) шару пластини, а коефіцієнт теплопередачі $k_{n-1,n}$ – від значення коефіцієнтів α_Σ і $\alpha_{i+1,i}$.

Для першого шару пластини значення постійної часу і коефіцієнтів тепловіддачі обчислюють за формулами:

$$\theta_1 = \frac{\Delta x \cdot \rho \cdot c}{\alpha_\Sigma + \alpha_{1,2}}; \quad k_{не,1} = \frac{\alpha_\Sigma}{\alpha_\Sigma + \alpha_{1,2}}; \quad k_{2,1} = \frac{\alpha_{1,2}}{\alpha_\Sigma + \alpha_{1,2}}, \quad (7)$$

а для n -го шару пластини як

$$\theta_n = \frac{\Delta x^2}{2a}; \quad k_{n-1,n} = 1. \quad (8)$$

Під час розглядання проміжних шарів пластини у разі однорідності металу за її товщиною $k_{не,1}, k_{1,2} \dots k_{n-1,n} = 0,5$, а значення коефіцієнтів $\theta_2, \theta_3, \theta_{n-1}$ визначають із співвідношення

$$\theta_2, \theta_3 \dots \theta_{n-1} = \frac{\Delta x^2}{2a}. \quad (9)$$

У роботі [6] наведено рівняння, що одержано формально шляхом переходу від класичного одновимірного диференціального рівняння теплопровідності у частинних похідних до його диференціально-різницевого вигляду:

$$\vartheta_i \frac{du_i}{d\tau} + u_i = k_i \cdot \omega \cdot (\tau - \tau_i). \quad (10)$$

де ϑ_i – постійна часу печі; k_i – коефіцієнт передавання; τ_i – запізнювання щодо i -го каналу управління; u_i, ω – взаємопов'язані функції.

Зіставлення рівнянь системи (6) з рівнянням (10) свідчить про їхній ідентичний характер, що є підтвердженням адекватності запропонованої математичної моделі загальноприйнятим уявленням.

Комп'ютерне подання системи (6) є ітераційною моделлю нагрівання пластини безмежної довжини, яка може бути реалізованою за допомогою пакету прикладних програм «*MatLab 6.5 SP1\7 + Simulink 5/6*», що є спеціально розроблені для аналогічних задач [7].

За даними роботи [8], коефіцієнти температуропровідності та теплопровідності вуглецевих сталей під час підвищення температури від 0 до 1400 К зменшуються приблизно у два рази, що проявляється в суттєвому зниженні інтенсивності теплопередачі за товщиною пластини від її першого шару до останнього.

Як приклад у табл. 1 наведено значення температури за товщиною пластини ($\Delta x = 0,04$ м) з теплофізичними характеристиками: $a = 0,4 \cdot 10^{-3}$ м²/с; $\rho = 7830$ кг/м³; $\lambda = 39$ Вт/(м·К), що обчислено за різними методами (I..III).

Таблиця 1 – Розподіл температури $T(x, \tau)$ за товщиною пластини

Методика обчислення	Товщина пластини, м								
	Температура, К								
	0	0,04	0,08	0,12	0,16	0,20	0,24	0,28	0,32
I	1300	1296	1293	1287	1278	1273	1262	1250	1244
II	1300	1297	1294	1288	1282	1276	1268	1256	1248
III	1300	1295	1292	1286	1280	1275	1266	1252	1246

Примітка: методика I за роботою [9]; методика II за роботою [10]; методика III за роботою авторів

Під час ідентифікації імітаційної моделі теплопровідності найбільшу невизначеність вносить коефіцієнт α_{Σ} , проблема знаходження якого у багатьох випадках є не менш складною, ніж проблема вирішення задачі теплопровідності.

Для забезпечення спільності підходу та можливості зіставлення результатів моделювання з результатами розрахунків під час використання інших методик сумарний коефіцієнт тепловіддачі від нагрівальних газів конвекцією та випромінюванням для першого шару записують як функцію критерію масивності Біо (Bi):

$$\alpha_{\Sigma} = \frac{Bi \cdot \lambda_m}{S}, \quad (11)$$

де λ_m – теплопровідність матеріалу, що нагрівають.

Для оцінки адекватності запропонованої моделі виконано чисельне розв'язання одновимірної диференціального рівняння теплопровідності кінцево-різницевою методом у неявному виді для різних значень критерію Біо та постійних значень теплофізичних властивостей металу. За виконанням зазначених обчислень приймали, що початковий розподіл температури за товщиною пластини є рівномірним $T(x, 0) = 293$ К. Максимальне відхилення різниці температури на поверхні та у центрі пластини не перевищує 15...20 градусів за значень критерію Біо 0,5; 1,0; 1,5; 5,0 і 10,0.

На запропонованій моделі кінцевий розподіл температури за товщиною пластини визначали шляхом підсумовування її початкового розподілу $T(x, 0)$ та розподілу температури $T(x, \tau)$, одержаного розрахунковим шляхом.

Результати виконаного моделювання підтверджують не стільки кількісну їх відповідність об'єкту дослідження, скільки можливість вирішення поставлених завдань щодо розробки температурно-часових режимів під час термічної обробки металу, а також вибирання оптимальних алгоритмів управління тепловим навантаженням термічної печі [11].

Запропонована модель після нескладних перетворень може бути застосованою для оцінки розподілу температури у тілах близьких за формою до циліндра або кулі з кінцевими радіусами R . Так, за аналогією з ізотермічними шарами пластини у циліндрі можна розглядати коаксіальні шари, а в кулі – концентричні сфери товщиною ΔR . Відмінності стосуються тільки обчислень постійних часу, значення яких залежить від площі поверхні теплообміну між шарами, що визначається кінцевими радіусами. Одночасно початок координат слід приймати в центрі перерізів тіл, а умова симетрії виконуватиметься відносно початку координат.

Висновки. Розроблена інженерна модель дозволяє фізично інтерпретувати механізм поширення теплоти в тілах різної форми. Її можна використовувати для оцінки розподілу температури у фізично неоднорідних, наприклад, шаруватих металах, в тілах будь-якої конфігурації за умови можливості виділення ізотермічних шарів рівної товщини, а також наявності рівномірного теплообміну з відкритих поверхонь. Можливість самонастроювання параметрів моделі залежно від температури дозволяє наблизити результати моделювання до реальних умов, і, тим самим, уникнути необхідності розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь теплопровідності.

Бібліографічний перелік

1. Губинский В. И., Лу Чжун-У. Теория пламенных печей. Москва : Машиностроение, 1995. 256 с. ISBN 5-217-02647-2.
2. Арутюнов В. И., Бухмиров В. В., Крупенников С. А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей. Москва : Metallurgiya, 1990. 239 с.
3. Коздоба Л. А. Вычислительная теплофизика. Киев : Наукова думка, 1992. 224 с.
4. Свинолобов Н. П. Инженерная модель в теории теплопроводности в трактовке И.Д. Семикина *Металлургическая теплотехника : сборник научных трудов государственной металлургической академии Украины*. Днепропетровск : ГМетАУ, 1999. Т. 2. С. 226-235.
5. Лисиенко В. Г., Лобанов В. И., Китаев Б. И. Теплофизика металлургических процессов Москва : Metallurgiya, 1982. 239 с.
6. Бутковский А. Г. Теория оптимального управления системами с распределенными параметрами. Москва : Наука, 1965. 476 с.
7. Дьяконов, В. П. Mat Lab 6.5 SP 1/7+Simulink 5/6 в математике и моделировании. Москва : СОЛОН-Пресс, 2005. 576 с. ISBN 5-98003-206-1.
8. Расчеты нагревательных печей / Под ред. Н. Ю. Тайца. Киев : Техника, 1969. 539 с.
9. Бухмиров В. В., Крупенников С. А. Упрощенный зональный метод расчета радиационного теплообмена в поглощающей и излучающей среде *Известия Вузов. Черная металлургия*. 1999. № 1. С. 68-70.
10. Ревун М. П., Каюков Ю. Н., Чепрасов А. И., Иванов В. И. Математическое моделирование нагрева металла в пламенной печи камерного типа (Сообщение 1) *Металургія. Наукові праці ЗДІА*. Запоріжжя, 2011. Вип. 23. С.
11. Зинченко В. Ю., Иванов В. И., Нестеренко Т. Н., Каюков Ю. Н. Имитационная модель теплопроводности для нагрева металла в термических печах *Materials of XVI International research and practice conference. Scientific horizons*. 30.09-07.10.2020. Sheffield. Science and education 2020. Vol. 5. С. 79-81

References

1. Gubinskiy V. J., Lu Chzhun-U. Teoriya plamennykh pechey. Moskva : Mashinostroenie, 1995. 256 p. ISBN 5-217-02647-2.
2. Arytyunov V. I., Bukhmirov V. V., Krypennikov S. A. Matematicheskoe modelirovanie teplovoy raboty promishlennykh pechey. Moskva. Metallurgiya, 1990. 239 p.
3. Kozdoba L. A. Vychislitel'naya teplofizika. Kiev, 1992. 224 p.

4. Svinolobov N. P. Inzhenernaya model' v teorii teploprovodnosti v traktovke J.D. Semikina. Metallurgicheskaya teplotekhnika : sbornik nauchnykh trydov gosudarstvennoy metallurgicheskoy akademii Ukrainy. Dnepropetrovsk : GMetAU, 1999. t. 2. pp. 226-235.
5. Lisienko V. G., Lobanov V. I., Kitaev B. I. Teplofizika metallurgicheskikh protsessov. Moskva : Metallurgiya, 1982. 239 p.
6. Butkovskiy A. G. Teoriya optimal'nogo upravleniya sistemami s raspredelennymi parametrami. Moskva : Nauka, 1965. 476 p.
7. D'yakonov V. P. Mat Lab 6,5 SP 1/7+Simulink 5/6 v matematike I modelirovanii. Moskva : SOLON-Press, 2005. 576 p. ISBN 5-98003-206-1.
8. Raschety nagrevatel'nykh pechey / Pod red. N. Yu. Taytsa. Kiev : Tekhnika, 1969. 539 p.
9. Bukhmirov V. V. Krupennikov S. A. Uproshchennyi zonal'nyy metod rascheta radiatsionnogo teploobmena v pogloshchayushchey i izlychayushchey srede. Izvestiya vuzov. Chernaya Metallurgiya. 1999. no. 1. pp. 68-70.
10. Revun M. P., Kayukov Yu. N., Cheprasov A. I., Ivanov V. I. Matematicheskoe modelirovanie nagreva metalla v plamennoy pechi kamernogo tipa (Soobshchenie 1), Metalurgiya : Naukovi pratsi ZDIA, Zaporizhzhya, 2011. vol. 23. pp. –
11. Zinchenko V. Yu., Ivsnov V. I., Nesterenko T. M., Kayukov Yu. M. Imitatsionnyaya model' teplopovodsosti dlya nagreva metalla v irmicheskikh poechakh. Materials of XVI Inrenational research and practive conference. Scientific horizons. 30.09-07.10.2020. Sheffield. Science and education 2020. vol. 5. pp. 79-81.

Zinchenko Vladimir, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporozhe national university.

Ivanov Viktor, senior staff scientist, Zaporozhe national university.

Nesterenko Tatiana, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporozhe national university.

Kayukov Yurii, associate professor, candidate of technical science, Zaporozhe national university.

DEVELOPMENT OF SIMULATED MODEL HEAT-CONDUCTING FOR AUTOMATION SYSTEMS CONTROL BY THERMAL FURNACES

Absence of the instrumental means for direct estimation of thermal state of metal in heat-treating furnaces generated necessities application of mathematical models which are based on use of classical differential heat-conduction equation in partial derivatives. However presence of essential dependence thermophysical properties of metal from temperature leads to non-linearity equation of heat-conducting. The subsequent analytical solution of equation with use of simplifications and assumptions is accompanied by considerable inaccuracies at definition of a distribution function determination for metal in space and in a time. Numeral methods of solution of the specified equation with application of finite-difference schemes do not allow to offer the recommendation for rational temperature-time modes of selection of high-heat treatment few the studied and new brands of steels. The engineering model heat sharing in the metal bodies, offered by J.D. Semikin is known. According to this a solid body, which heat up thermally, represent as n layers with equal temperature and thermophysical properties. At warmth supply to such body there is a consecutive heat of the designated layers. At a significant amount of these layers in a massive body such engineering model comes nearer to the system continuously dispense in space. Computer representation of such system is a simulated model of heating of infinite length plate which can be implemented by means of application package of «Mat Lab 6.5 SP1\7+Simulink 5/6» programs, which are specially dedicated for analogous tasks. Simulation results confirm a possibility of the solution of tasks for working out of temperature-time modes at metal high-heat treatment, and also selection of optimal control algorithms for high-heat thermal furnace.

Стаття надійшла: 15.06.2020 р.

УДК 621.745.33:536.24

DOI <https://doi.org/10.26661/2071-3789-2020-1-14>

Каюков Юрій Миколайович, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0003-4311-4801

Іванов Віктор Ілліч, старший науковий співробітник, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0001-8816-3506

Рижков Вадим Генієвич, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-9464-299X

Назаренко Ірина Анатоліївна, доцент, кандидат технічних наук, національний університет «Запорізька політехніка», ORCID: 0000-0003-4200-4424

ДО ОБЧИСЛЕННЯ СПРЯЖЕНОГО ТЕПЛООБМІНУ У ПОЛУМЕНЕВИХ ПЕЧАХ КАМЕРНОГО ТИПУ

Розроблено математичну модель нагрівання сталевих заготовок у полуменевих печах камерного типу. Задачу теплообміну вирішено за допомогою зонального методу з урахуванням наявності факела, руху нагрівального середовища, втрат теплоти через огороження печі, а також акумульовано кладкою. Досліджено вплив довжини факела, а також імпульсного режиму опалювання печі на якісні показники нагрівання металу. Встановлено, що достатньо рівномірного нагрівання металу досягнуто за довжини факела, яка є зіставленою із шириною робочого об'єму камери, та під час реалізації імпульсного режиму опалювання печі у період витримки.

Ключові слова: полуменева піч камерного типу, сталеві заготовки, нагрівання металу під термічну обробку, математична модель, імпульсний режим опалювання печі

Вступ. Під час проектування нових і реконструкції діючих полуменевих печей головним завданням є забезпечення достатньо високої рівномірності нагрівання металу на момент його видавання із робочого об'єму. Найскладніше вирішувати зазначену задачу для полуменевих печей, камерного типу [1], де спалювання палива сприяє формуванню нерівномірного розподілу температури в робочому об'ємі камери та, як наслідок, нерівномірного підведення теплоти до поверхні металу, якого нагрівають.

На деяких металургійних підприємствах України сталеві заготовки перед куванням піддають нагріванню в двокамерних полуменевих печах. Кожну камеру обладнано незалежними системами опалювання та відведення продуктів горіння. Система опалювання зазначених печей складається з восьми пальників, які встановлено на одній бічній стінці камери у два ряди за її висотою: чотири пальники типу ГНП-5 та чотири пальники типу ГНП-3 утворюють відповідно верхню та нижню зони опалювання. Продукти горіння видаляють через канали, які рівномірно розташовано уздовж бічних стін камери.

Наявність верхньої та нижньої зон опалювання печі забезпечує двостороннє підведення теплоти до заготовок, що розташовано на подових підставках, проте за факельним спалюванням палива не сприяє досягненню рівномірного нагрівання металу, що розташовано у напрямі руху нагрівального середовища.

Постановка завдання. Метою досліджень є аналіз впливу параметрів факела на головні характеристики теплообміну в полуменевій печі камерного типу, а також оцінювання впливу різних систем опалювання печі на рівномірність нагрівання металу та засвоєння ним теплоти.

Головна частина досліджень. Для оцінювання рівномірності нагрівання металу за різних режимів опалювання печей камерного типу розроблено математичну модель, що заснована на вирішенні пов'язаної задачі зовнішнього та внутрішнього теплообміну за дискретним часом.

Під час вирішення задачі зовнішнього теплообміну з використанням зонального методу [2,3] приймали наступні припущення:

- сталеві заготовки прямокутного перерізу, що укладають в один шар без проміжків, подають у вигляді пластини;
- наявність верхньої та нижньої зон опалювання забезпечує симетричне за товщиною сталевих заготовок нагрівання металу у печі;
- тіла, що беруть участь у променистому теплообміні (метал, кладка та продукти горіння) є сірими, а випромінювання й віддзеркалення променистої енергії поверхнями металу та кладки – дифузним.

Зональну модель зовнішнього теплообміну в робочому об'ємі полуменевої печі камерного типу подавали замкнутою системою, що створена твердими непрозорими тілами, розділеними поглинально-випромінювальним середовищем. Для урахування змінювання складу продуктів горіння й оптичних властивостей середовища у напрямі розвитку факела систему поділяли відповідно до рекомендацій роботи [ИВЧМ,4] на п'ять об'ємних зон факела і продуктів горіння, п'ять плоских поверхневих зон металу та сімнадцять плоских поверхневих зон кладки.

Довжину факела, концентрацію палива, ступінь його згоряння, підсисання повітря до зони горіння, а також концентрацію випромінювальних компонентів продуктів горіння за довжиною факела, обчислювали з використанням рекомендацій роботи [5] та з урахуванням співвідношень [6,7], що мають вигляд:

$$\ell_n \approx 0,7 \cdot \ell_\phi, \quad (1)$$

де ℓ_n – довжина підсисання (відстань від пальника до перерізу на осі факела, де всю кількість повітря, яка є теоретично необхідною для згоряння палива, подають до зони горіння та ступінь його вигорання складає 0,85); ℓ_ϕ – довжина факела (відстань від виходу з пальника до перерізу на його осі, де значення середнього хімічного недопалу палива становить 2,0 %).

В межах кожної поверхневої зони абсолютну температуру нагрівального середовища, концентрацію його поглинально-випромінювальних компонентів (CO_2 , H_2O), а також значення ступеня чорноти у межах кожної об'ємної зони приймали постійними. Об'ємне випромінювання нагрівального середовища замінювали еквівалентним дифузним випромінюванням уявної поверхні, яка має ступінь чорноти, що дорівнює ступеню чорноти об'ємної зони. Окрім того, вводили умовні абсолютно чорні поверхні, які відділяють i -ту об'ємну зону від суміжних j -тих об'ємних зон, що дозволяє подати зональну модель теплообміну у вигляді окремих підсистем.

Взаємодія суміжних підсистем здійснюється через відповідні умовні поверхні, які мають значення температури, за яких щільність потоків результуючого випромінювання на межах підсистеми зберігає своє дійсне значення. Визначення значень зазначеної температури виконують шляхом обчислення радіаційного теплообміну в окремих підсистемах та узгодження їх значень на межах суміжних підсистем щодо залежності

$$q_{j,i} = -q_{i,j} = \sigma_0 \cdot [\theta_{j,i}^4 - \theta_{i,j}^4], \quad (2)$$

де q_{ij} – щільність потоку результуючого випромінювання, яка проходить через умовну поверхню, що відділяє j -ту об'ємну зону від суміжної i -ої об'ємної зони; θ_{ij} , θ_{ji} – температури умовних поверхонь, що відділяють i -ту об'ємну зону від суміжної j -ої об'ємної зони та j -ту об'ємну зону від суміжної i -ої об'ємної зони відповідно; σ_0 – постійна Стефана-Больцмана.

Обчислення радіаційного теплообміну в межах окремої підсистеми виконували з використанням резольвентного зонального методу [8]. Записували систему рівнянь, що містить:

– зональні рівняння для поверхневих зон

$$Q_i = \sum_{k=1}^n \alpha_{k,i} \cdot \theta_k^4, \quad i = 1, \dots, n-1, \quad (2)$$

– зональне рівняння для об'ємної зони

$$\sum_{k=1}^n \alpha_{k,i} \cdot \theta_k^4 + \alpha_i \cdot \theta_i + g_i^0 + Q_i^v = 0, \quad i = n; \quad (3)$$

де Q_i – результуючий тепловий потік; $\alpha_{k,i}$ – коефіцієнт радіаційного теплообміну; θ_k – температура k -ої зони; α_i – коефіцієнт конвективного теплообміну для об'ємної зони i -ої підсистеми; g_i^0 – сума складових, що не залежить від температури об'ємної зони; Q_i^v – виділення теплоти в об'ємній зоні.

За відомих значень температури поверхневих зон, а також виділення теплоти в об'ємних зонах печі розв'язання системи зональних рівнянь (3), (4) разом з рівнянням (2) дає змогу визначати на кожному часовому кроці значення температури об'ємних зон і результуючих теплових потоків для поверхневих зон.

Поверхневі зони моделі є межами, що відділяють об'ємні газові зони від об'ємних зон металу та кладки. Припущення про постійність величин, які характеризують теплообмін у межах кожної обчислювальної поверхневої зони, дає змогу описувати нагрівання об'ємних зон металу та кладки, поданих у вигляді нескінченних одно- і двошарових пластин, одновимірним диференціальним рівнянням нестационарної теплопровідності у декартових координатах:

$$c'(\theta) \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(\theta) \cdot \frac{\partial t}{\partial y} \right], \quad 0 \leq \tau \leq \tau_k, \quad (5)$$

де τ – поточний час; y – поточна координата на осі, що є перпендикулярною до відповідної поверхневої зони та спрямованою у бік підвищення температури; θ , τ_n , c' , λ – температура; час нагрівання; об'ємна питома теплоємність і коефіцієнт теплопровідності матеріалу шару об'ємної зони металу або кладки.

Диференціальне рівняння (5) доповнюють відповідними крайовими умовами.

Вирішення задачі внутрішнього теплообміну виконували методом кінцевих різниць за неявною чотирьохточковою схемою. Одночасно на кожному часовому кроці здійснювали визначення дискретних полів температури об'ємних зон металу та кладки, а також температури відповідних їм поверхневих зон.

Оцінювання результатів чисельного дослідження теплообміну в даній печі дало змогу встановити, що досягнення високої рівномірності нагрівання металу можна забезпечити під час спалювання палива з отриманням подовжених факелів, які не перевищують розміри робочої камери печі.

Для кількісної характеристики впливу факела на умови теплообміну в робочому об'ємі печі використовували критерій нерівномірності розподілу теплових потоків $K_q = q_{\max}/q_{\text{сер}}$, де q_{\max} , $q_{\text{сер}}$ – відповідно максимальна та середня на поверхні сталевих заготовок, що нагрівають, щільність результуючого теплового потоку для факела певної довжини. Якість нагрівання металу оцінювали критеріями $\sigma_1 \Delta \theta$ і $\sigma_2 \Delta \theta$, де $\sigma_1 \Delta \theta$, $\sigma_2 \Delta \theta$ – середньоквадратичні відхилення від середнього значення різниць температури між показанням пічного термодавача та температурами поверхні металу θ_n у зонах, а також зональних перепадів температури між поверхнею θ_n і тепловим центром θ_y сталевих загото-

вок, що нагрівають, відповідно. Результати обчислень щодо впливу довжини факела на якісні показники роботи печі подано у табл. 1.

Таблиця 1 – Якісні показники роботи двохкамерної нагрівальної печі під час спалювання палива у факелі різної довжини

Параметри	Відносна довжина шляху підсисання факела L_n							
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
K_q	1,26	1,25	1,21	1,17	1,11	1,07	1,11	1,13
$\sigma_1\Delta T$	45,00	40,10	32,50	22,30	18,50	22,60	29,20	34,40
$\sigma_2\Delta T$	12,60	11,40	9,50	7,00	6,40	10,20	14,40	18,20

Встановлено, що залежність змінювання критеріїв K_q , $\sigma_1\Delta\theta$ і $\sigma_2\Delta\theta$, які характеризують нерівномірність нагрівання металу, від довжини факела, має екстремальний характер. Так, для дослідженого інтервалу значень параметра L_n найбільш нерівномірне нагрівання металу зафіксовано для факела мінімальної довжини, під час збільшення довжини факела значення зазначених критеріїв монотонно зменшуються та сягають мінімального значення за $L_n = 0,5 \dots 0,6$. Для факела з відносною довжиною підсисання більше ніж 0,6 спостерігали зростання нерівномірного розподілу результуючих теплових потоків, що, в свою чергу, призводить до зниження якісних показників нагрівання металу.

Одним з напрямів підвищення якості нагрівання металу в печах камерного типу є імпульсне подавання палива в період витримки [9]. Імпульсний режим опалювання передбачає постійне подавання палива для періоду підвищення температури у печі та його імпульсне подавання для періоду витримки, тобто у зазначений період його подавання до печі виконують за зниженням температури до мінімально припустимого рівня та припиняють у разі її підвищення до максимально припустимого значення. Тривалість подавання палива під час одного імпульсу за імпульсним режимом опалювання визначається автоматично: на початок періоду витримки вона має максимальне значення, у кінці періоду – мінімальний рівень.

Для вибраної довжини факела природного газу $L_n = \ell_n/B = 5$ (де ℓ_n , B – довжина шляху підсисання факела та геометричний розмір робочої камери печі у напрямі розвитку факела) виконано порівняльне оцінювання якісних показників нагрівання металу за типовим (безперервне подавання палива в період витримки) та імпульсним (циклічне подавання палива для періоду витримки) режимами. Для зіставлення результатів нагрівання в обох випадках приймали тривалість періоду витримки три години. Якість нагрівання металу для зон печі оцінювали за перепадом температури на поверхні металу $\Delta\theta_n$, а також перепадів температури щодо перерізу сталевієї заготовки $\Delta\theta_y$ (між температурами поверхні θ_n та теплового центру (θ_y)). Результати обчислень температури у зонах печі на момент завершення нагрівання сталевих заготовок за типовим (чисельник) та імпульсним (знаменник) режимами нагрівання наведено у табл. 2. Температури нагрівального середовища $\theta_{нз}$, поверхні θ_n та теплового центру сталевих заготовок θ_y , що нагрівають, відповідають номерам їх об'ємних зон.

Як свідчать результати досліджень, за імпульсним режимом опалювання печі, на відміну від типового, забезпечується циклічне змінювання довжини факела від максимального до допустимо мінімального значення, що дає змогу використовувати переваги довгого факела у період витримки печі. Наявність пульсуючого факела сприяє зниженню до мінімуму нерівномірного розподілу температури на поверхні сталевих заготовок, що нагрівають, а отже, поліпшенню рівномірного розподілу теплових потоків на поверхні заготовок.

Таблиця 2 – Розподіл температури по завершених періоду витримки металу за зонами печі (відносна довжина шляху підсисання факела $L_n = 0,5$)

Параметр	Значення параметра в об'ємній зоні				
	1	2	3	4	5
$\theta_{нз}, ^\circ\text{C}$	1155/1180	1230/1200	1180/1200	1165/1190	1175/1200
$\theta_n, ^\circ\text{C}$	1140/1150	1145/1150	1140/1155	1135/1155	1140/1150
$\theta_{уз}, ^\circ\text{C}$	1120/1140	1125/1140	1120/1140	1115/1145	1120/1145
$\Delta\theta_n, ^\circ\text{C}$	25,7/14,80	27,6/18,6	28,5/17,9	24,9/15,2	20,4/14,3
$\Delta\theta_{уз}, ^\circ\text{C}$	10,32/9,69	5,44/4,54	4,46/4,28	6,91/6,82	10,84/9,06

Застосування імпульсного режиму опалювання печей дає змогу підвищити температуру в останній за ходом факела об'ємній нагрівальній зоні порівняно з типовим режимом опалювання, що, незважаючи на деяке збільшення втрат теплоти з продуктами горіння, які відходять, супроводжується зростанням теплового вмісту металу в цій зоні.

Висновки. Виконано розробку імітаційної моделі нагрівання сталевих заготовок у полумєневих печах камерного типу. З використанням такої моделі здійснено чисельні дослідження теплообміну в робочому об'ємі зазначених печей. Встановлено, що для досягнення високих показників якості нагрівання металу найбільш прийнятною є система опалювання, яка забезпечує спалювання палива у гранично довгих факелах. Порівняльне оцінювання нагрівання металу, що отримують з використанням типового та імпульсного режимів опалювання печей, свідчить про переваги імпульсного режиму.

Бібліографічний перелік

1. Губинский В. И. Актуальные задачи реконструкции нагревательных печей *Металлургическая теплотехника* Сборник научных трудов НМетАУ. В 2-х томах. Днепропетровск : Пороги, 2005. Т. 1. С. 149-155.
2. Арутюнов В. И., Бухмиров В. В., Крупенников С. А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей. Москва : Metallurgiya, 1990. 239 с.
3. Крупенников С. А. Зональный метод расчета радиационного и сложного теплообмена: основные положения и способы численной реализации *Известия Вузов. Черная металлургия*. 2006. № 3. С. 59-62.
4. Ревун М. П., Каюков Ю. Н., Иванов В. И., Чепрасов А. И. К расчету сопряженного теплообмена печей, работающих в камерном режиме *Известия Вузов. Черная металлургия*. 2018. № 2. С. 32-34.
5. Расчеты нагревательных печей / Под ред. Н. Ю. Тайца. Киев : Техника, 1969. 539 с.
6. Лисиенко В. Г. Интенсификация теплообмена в пламенных печах. Москва : Metallurgiya, 1979. 224 с.
7. Лисиенко В. Г., Лобанов В. И., Китаев Б. И. Теплофизика металлургических процессов. Москва : Metallurgiya, 1982. 239 с.
8. Суринов Ю. А. Обобщенный зональный метод исследования и расчета лучистого теплообмена в поглощающей и рассеивающей среде *Известия АН СССР. Энергетика и транспорт*. 1975. Вып. 4. С. 112-137.
9. Ревун М. П., Франк Ф. Ф., Высочин Б. Г. Система импульсного отопления камерных нагревательных печей *Сталь*. 1983. № 9. С. 84-87.
10. Ревун М. П., Чепрасов А. И., Каюков Ю. Н. Импульсное отопление нагревательных колодцев / *Черная металлургия*. 1987. Вып. 8 (1036). С. 58-59.

References

1. Gubinskiy V. I. Aktual'nye zadachi rekonstruktsii nagrevatel'nykh pechey *Metallurgicheskaya teplotekhnika*. Sbornik nauchnykh trudov NMetAU. V 2-kh tomakh. Dnepropetrovsk : Porogi, 2005. t. 1. pp. 149-155.

2. Arutyunov V. I., Bukhmirov V. V., Krupennikov S. A. Matematicheskoe modelirovanie teplovy raboty promyshlennykh pechey. Moskva : Metallurgiya, 1990. 239 p.
3. Krupennikov S. A. Zonal'nyy metod rascheta raziatsionnogo i slozhnogo teploobmena: osnovnye polozeniya i sposoby cheslennoy realizatsii *Izvestiya Vuzov. Chernaya Metallurgiya*. 2006. no. 3. pp. 59-62.
4. Revun M. P., Kayukov Yu. N., Ivanov V. I., Cheprasov A. I. K raschetu sopryazhennogo teploobmena pechey, robotayushchikh v kamernom regime *Izvestiya Vuzov. Chernaya Metallurgiya..* 2018. no. 2. pp. 32-34.
5. Raschety nagrevatel'nykh pechey / Pod red. N. Yu. Taytsa. Kiev : Tekhnika, 1969. 539 p.
6. Lisienko V. G. Intensifikatsiya teploobmena v plamennykh pechakh. Moskva : Metallurgiya, 1979. 224 p.
7. Lisienko V. G., Lobanov V. I., Kitaev B. I. Teplofizika metallurgicheskikh protsessov. Moskva : Metallurgiya, 1982. 239 p.
8. Surinov Yu. A. Obobshchennyy zonal'nyy metod issledovaniya i rascheta luchistogo teploobmena v pogloshchayushchey i rasseivayushchey srede *Uzvestiya AS USSR. Energetika itransport*. 1975. vol. 4. pp. 112-137.
9. Revun M. P., Frank F. F., Bysochin B. G. Sistema impul'snogo otopeniya kamernykh nagrevatel'nykh pechey. *Stal'*. 1983. no. 9. pp 84-87.
10. Revun M. P., Kayukov Yu. N., Cheprasov A. I. Impul'snoe otopenie nagrevatel'nykh kolodtsev. *Chernaya Metallurgiya*. 1987. vol. 8 (1036). pp 58-59.

Kayukov Yurii, associate professor, candidate of technical science, Zaporozhe national university

Ivanov Viktor, senior staff scientist, Zaporozhe national university

Ryzhkov Vadym, associate professor, candidate of technical science, Zaporozhe national university

Nazarenko Irina, associate professor, candidate of technical science, Zaporozhe National Technical university «Zaporozhe polytechnics»

TO CALCULATION OF CONJUGATED HEAT EXCHANGE IN FLAMING FURNACES OF CHAMBER TYPE

During planning of new and reconstruction of operating flaming chamber furnaces it is necessary to provide the conditions for achievement of high evenness heating metals in the moment of output from the work volume furnace. For the evaluation of metal heating evenness at the different modes of work furnaces of noted type a mathematical model, which is based on the decision of the connected task of external and internal heat exchange at discrete time is worked out. The zonal model of external heat exchange in the work volume of the noted furnace is given by the closed system, which is created by opaque solids, divided by an absorptive-radiate medium. The system is divided into five volume areas of torch and combustion gas, five flat superficial areas of metal and seventeen flat superficial areas of furnace lining. Within the limits of every superficial area absolute temperature of heater medium, concentration of its absorptive-radiate components, accepted fixed. The volume radiation of heater medium is replaced by the equivalent diffuse radiation of imaginary surface, which has a degree of blackness which has a degree of blackness which equals the degree of blackness for volume area. Except for that, entered conditional absolutely black surfaces which separate i volume area from contiguous j volume areas. The calculations of radiation heat exchange within the limits of separate subsystem executed with the use of resolving zonal method. One of directions for quality metal heating in the furnaces of chamber type there is impulsive input of fuel in the period of self-control of metal. Application of the noted mode for heating of furnace allows to promote a temperature in the last on motion of torch to the volume heater area comparatively with the typical mode of heating, that accompanied by the increase of thermal content of metal in this area.

Стаття надійшла: 10.07.2020 р.

УДК 669.1-47.42]:331

DOI <https://doi.org/10.26661/2071-3789-2020-1-15>

Биткін Сергій Віталійович, начальник відділу, кандидат технічних наук, ПАО «Металургійний комбінат «Запоріжсталь». ORCID: 0000-0003-3583-3371

Критська Тетяна Володимирівна, завідувач кафедри, доктор технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-001-6933-0460

МЕТОДИКА СТАТИСТИЧНОЇ ОЦІНКИ РЕЗУЛЬТАТІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ В ЧОРНІЙ МЕТАЛУРГІЇ У СЕРЕДОВИЩІ «STATISTICA» ТА «MATHCAD»

Показана можливість використання прикладних пакетів «STATISTICA» та «MathCAD» для оцінки ефективності застосування нового технологічного вирішення (розкислювання із застосуванням феросилікоалюмінію (ФСА)). Для вирішення завдання, пов'язаного з аналізом експериментальних даних застосовують стохастичні, ймовірнісні методи, які дозволяють виявляти закономірності технологічних відхилень. Як приклад розглянуто статистичний аналіз експериментальних даних за дослідною плавкою 09Г2Д. Досліджено розподіл межі плинності σ_T для зразків, виготовлених із стандартної сталі 09Г2Д, а також із дослідної сталі 09Г2Д. Використано гістограми «STATISTICA», що описують розподіл межі плинності 09Г2Д за стандартної технології та технології із застосуванням ФСА, які апроксимуються функцією розподілу щільності ймовірності чисельного значення ознаки. Отримані розподіли будують у програмі «MathCAD» з одночасним переходом до ймовірнісного подання залежностей. Основним ефектом застосування ФСА є зниження дисперсії механічних властивостей сталі 09Г2Д.

Ключові слова: технологічний експеримент, феросилікоалюміній, застосування, металопрокат, механічні властивості, програми «STATISTICA» та «MathCAD»

Вступ. Статистичні методи обробки даних є поширеним математичним апаратом для аналізу хімічного складу сталі та результатів механічних випробувань металопрокату, а також виконання інших досліджень металургійних процесів. Технологам, що мають відповідну теоретичну підготовку, в умовах безперервного виробництва підприємства досить складно вибрати та застосувати методіку виконання дослідження й обробки отриманих експериментальних результатів [1].

Літературний огляд. Для вирішення завдань, пов'язаних з аналізом результатів за наявності випадкових і/або непередбачених (невідомих) чинників (наприклад, різний хімічний склад масиву плавки сталі та результатів однієї дослідної плавки за наявності невеликого варіаційного ряду вимірювань, умов прокатки, зокрема, швидкості нагрівання та охолодження в діапазонах температури, що змінюються) застосовують методи математичної статистики [2]. Ці стохастичні, ймовірнісні методи дають змогу виявляти закономірності технологічних відхилень (механічні властивості зразків сталі, на яких вимірювали межу плинності і міцності, пов'язані не лише з хімічним складом, але і термомеханічними діями під час прокатки та їх відхилення будуть різними), виконувати обґрунтовані висновки та прогнози, давати оцінки вірогідності чисельних значень не лише меж плинності і міцності, але і будь-яких інших фізичних величин [3]. Досягається це порівнянням не окремих чисельних значень характеристик металопрокату, а їх вірогідності [4]. Є досвід застосування економо-фізичних методів розрахунку для оцінки експлуатаційної стійкості прокатних валків, підшипників і вогнетривких матеріалів [5].

Математична статистика у чорній металургії, як і в інших галузях промисловості, використовує методи та результати теорії вірогідності [6-8]. Для технологічних досліджень її застосування, як правило, передбачає наступні етапи [9]:

– побудова ймовірнісної моделі результатів вимірювань за виконанням стандартного та нового технологічного процесу (у його частині, що вивчають), використовуючи экс-

периментальні дані, тобто, визначаючи вірогідність чисельних значень технічних характеристик за схемою: гістограма + функція щільності розподілу вірогідності у програмі «STATISTICA» + побудова функції у програмі «MathCAD», виконують моделювання форми розподілу ознаки (вміст хімічного елементу, межі плинності або міцності, будь-якої іншої фізичної величини («ознаки» в термінології статистики)) і виконання розрахунків з використанням прикладних статистичних і/або математичних програмних пакетів;

– інтерпретація змінювань конкретного виду розподілу контрольованих параметрів технологічного процесу стосовно реальної ситуації й ухвалення відповідного вирішення (наприклад, про змінювання фізико-механічних і/або хімічних властивостей сталі під час застосування нового методу розливання, продування, феросилікоалюмінію (ФСА) та будь-якого іншого технічного вирішення).

Складність полягає у правильності побудови ймовірносно-статистичних моделей і перевіряння їх коректності.

Постановка завдання. Метою роботи є підтвердження можливості використання прикладних пакетів «STATISTICA» та «MathCAD» для оцінки ефективності застосування нового технологічного вирішення в мартенівському цеху підприємства (розкислювання із застосуванням феросилікоалюмінію).

Основна частина досліджень. Як приклад розглянемо статистичний аналіз експериментальних даних щодо дослідної плавки сталі 09Г2Д. Фізико-хімічні основи застосування феросилікоалюмінію (ФСА) активно досліджуються після патентування в 2013 р. сплаву «Казахстанський» для розкислювання та легування сталі. Показана перспективність застосування ФСА з точки зору видалення неметалічних домішок [10,11]. Стандартна технологія призводить до високої міри забрудненості металопродукату неметалічними (корунд Al_2O_3 , силікати $MnO \cdot SiO_2$ і $FeO \cdot SiO_2$, сульфідні й оксисульфідні) включеннями, що вказує на необхідність застосування нових способів розкислювання з ефективною дією на природу та характер включення. Потрапляючи до рідкого металевого розплаву щільністю $\sim 7000 \text{ кг/м}^3$, феросилікоалюміній, щільністю $\sim 5500 \dots 6300 \text{ кг/м}^3$, спливає до межі металу з рідким шлаком (щільність шлаку $\sim 2900 \text{ кг/м}^3$) значно повільніше, ніж алюміній з щільністю 2697 кг/м^3 : механізм процесу запропоновано у роботі [12]. У шлаковому розплаві ФСА не спливає, тоді, як алюміній продовжує спливати в шлаковій фазі до контакту з газовою фазою, додатково при цьому згораючи, а, не реагуючи з киснем [O], що розчинено у металі. Автори публікацій зв'язують зменшення кількості неметалічних включень з утворенням легкоплавких складних оксидів [13], які легко спливають у шлак (табл. 1).

Саме тому, для одержання легкоплавких сполук як продуктів реакції під час розкислювання, використовують комплексні розкислювачі.

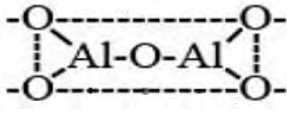
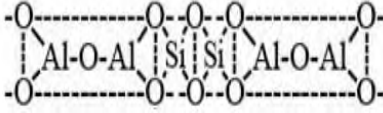
У роботах [14,15] показано, що ефективно віддаляються лише досить великі неметалічні включення. Швидкість спливання часточок шлаку (V) можна приблизно оцінити за формулою для швидкості підйому часточок у в'язкому середовищі, яку визначають рівнянням Стоксу:

$$V = \frac{2g \cdot r^2}{9\eta} \cdot (\gamma_m - \gamma_{шл}) , \quad (1)$$

де g – прискорення вільного падіння, м/с^2 ; η – динамічна в'язкість розплавленого металу, $\text{кг/(м}\cdot\text{с)}$; r – радіус часточки, м ; γ_m , $\gamma_{шл}$ – щільність металу та шлакових часточок, кг/м^3 , відповідно.

Швидкість спливання часточок шлаку V зростає під час збільшення радіусу (розміру) часточки, за зменшенням щільності шлакових часточок і підвищення температури сталі (знижується в'язкість розплавленого металу). Злипання твердих часточок відбувається набагато повільніше та важче, ніж злиття крапель, тому неметалічні включення повинні мати температуру плавлення нижче температури рідкої сталі ($\sim 1873 \text{ K}$).

Таблиця 1 – Структурні формули та властивості оксидів з різним складом

Хімічна формула	Структурна формула	За яких умов утворюється
Al_2O_3		Застосування алюмінієвої катанки, чушок: корунд з розплаву віддається неефективно, створює передумови для дефекту «розшарування»
$Al_2O_3 \cdot SiO_2$		Застосування комплексного розкислювача призводить до ефективного видалення складних оксидів і зменшення забрудненості металопрокату

Відомо, що температура плавлення корунду складає ~ 2323 К, тому він погано віддається з розплаву до шлаку. Продукти розкислювання у вигляді чистих оксидів знаходяться у металі в твердому стані, а у вигляді сполук – у формі рідких крапель. Суть комплексного розкислювання полягає у підвищенні реакційної здатності окремих елементів за рахунок створення вигідніших енергетичних умов, за яких повніше відбуваються реакції взаємодії елементів з розчиненим киснем [16]. У феросплавах, які широко вживають у металургії (силікомарганець і феросиліцій), кремній створює з основою міцні інтерметаліди. Алюміній, що подають в сталь у складі комплексної сполуки, не створює міцних зв'язків з кремнієм, залізом або марганцем. Ймовірно, за подачею алюмінію послабляються зв'язки кремнію із залізом або марганцем, що за введенням до розкислюваної сталі значно підвищує активність цього розкислювача порівняно з традиційними розкислювачами, тобто має місце «синергетичний ефект». Використання феросилікоалюмінію (ФСА) має, судячи за публікаціями, фундаментальні переваги перед іншими комплексними розкислювачами. В той же час, вплив ФСА на механічні властивості металопрокату вивчено недостатньо.

У даній роботі досліджено розподіл межі плинності σ_T для зразків, виготовлених як із стандартної сталі 09Г2Д, так і дослідної сталі 09Г2Д (технологія із застосуванням ФСА) у кількості двох тонн на 250 т сталі, при цьому одну тонну додавали у піч, а другу тонну безпосередньо в ковш.

Застосовували описану вище методику оцінки технологічного вирішення, при цьому завдання вирішували таким чином.

1. Масив експериментальних даних і даних з бази підприємства імпортували в програму «STATISTICA», яка виконувала побудову гістограм, що описують розподіл фізичної величини, наприклад, для межі плинності сталі 09Г2Д за стандартної технології та технології з ФСА й апроксимували функцією розподілу щільності вірогідності чисельного значення ознаки $\varphi(x)$.

Позначення у програмі «STATISTICA» функцій $\varphi(x)$:

– щільність ймовірності нормального розподілу

$$\text{normal}(x, a, b) \equiv \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot \exp\left(-\frac{x - \mu}{2\sigma^2}\right),$$

де a – параметр локалізації (середнє значення); μ – середнє значення; σ – стандартне відхилення; b – параметр масштабування ($b > 0$);

– щільність ймовірності екстремального розподілу

$$\text{extreme}(x, a, b) \equiv \frac{1}{b} \cdot \exp\left(-\frac{x - a}{b}\right) \cdot \exp\left[-\exp\left(-\frac{x - a}{b}\right)\right]; ,$$

– щільність ймовірності логічного розподілу

$$\text{logic}(x, a, b) \equiv \frac{1}{b} \cdot \exp\left(-\frac{x - a}{b}\right) \cdot \exp\left[1 + \exp\left(-\frac{x - a}{b}\right)\right]^{-2}$$

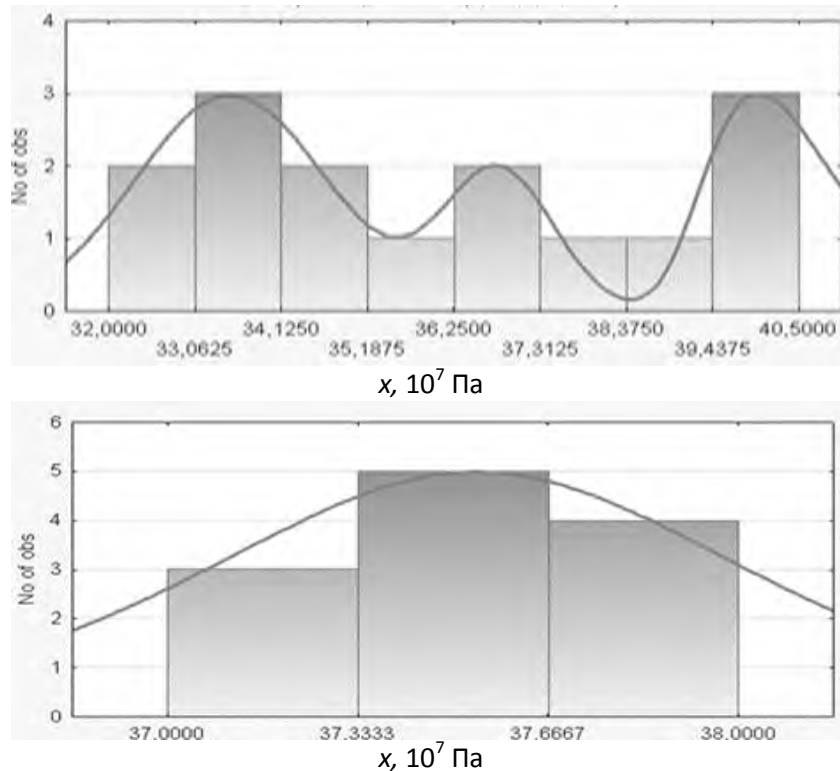


Рисунок 1 – Багатомодальний (стандартна технологія, верхній) та одномодальний (технологія, що використовує ФСА, нижній), розподіл чисельних значень межі плинності сталі 09Г2Д, що описано функцією розподілу щільності ймовірності

Наведено залежності ще є не придатними для порівняльного аналізу: є неоднорідний багатомодальний розподіл з різними точками екстремумів, різні розміри вибірок і тільки параметри розподілів, які сформовано програмою «STATISTICA». Потрібним є виконання розрахунку середньозваженого значення ознаки (межі плинності) та його дисперсії, що можливо із застосуванням програми «MathCAD», де є вбудовані функції $dnorm$ і $dlogis$, що дозволяє мінімально використовувати функції в явному вигляді за одночасному застосуванні вказаних програм.

2. Виконують побудову розподілів у програмі «MathCAD» з одночасним переходом до ймовірнісного подання залежностей (розподіл кількості спостережень, що відповідають певному чисельному значенню межі плинності (чи будь-якої іншої фізичної або хімічної величини). На рис. 2 подано результати технологічного експерименту. Зафіксовано істотне зниження дисперсії механічних властивостей металопрокату із застосуванням ФСА.

3. Розраховують чисельні значення параметрів [19], що характеризують отримані розподіли, вже не прив'язані ні до коливань хімічного складу сталі, ні до кількості вимірювань вибірки:

– середньозважені значення \tilde{X} (математичне очікування $M[X]$ межі плинності для стандартних та експериментальних зразків)

$$\tilde{X} = M[X] = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot \varphi(x) dx$$

де x – поточне значення ознаки в інтервалі вимірювань; $\varphi(x)$ – щільність ймовірності дослідженої ознаки;

– дисперсію $D[X]$ цієї фізичної величини

$$D[X] = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - M[X])^2 \cdot \varphi(x) dx$$

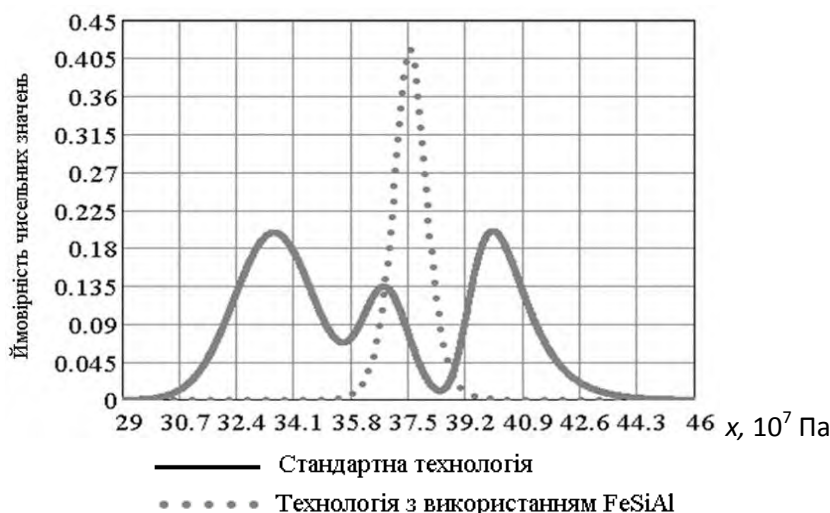


Рисунок 2 – Порівняння результатів технологічного експерименту (істотне зниження дисперсії механічних властивостей металопрокату із застосуванням ФСА)

Результати виконаних розрахунків подано у табл. 2.

Таблиця 2 – Результати моделювання розподілів експериментальних даних

Технологія	Умовна межа плинності, \bar{X} , 10^7 , Па	Середньоквадратичне відхилення, $\sqrt{D[X]}$, 10^7 , Па
Стандартна	36,92	1,70
Із застосуванням ФСА	37,54	0,58

Таким чином, порівняння результатів однієї дослідної плавки із застосуванням ФСА і масиву плавок за стандартною технологією є цілком можливим, хоча сильне зниження середнього значення дисперсії за застосуванням нового розкислювача потребує виконання додаткових експериментів, тобто здійснення декількох плавок із статистичною обробкою результатів за описаною схемою, що дозволить побудувати моделі впливу застосування ФСА на властивості сталі 09Г2Д.

Висновки і пропозиції.

1. Застосування пакетів «STATISTICA» та «MathCAD» для обробки результатів технологічного експерименту дає змогу отримувати наочні результати відносно ефективності застосування технічних вирішень і висувати обґрунтовані гіпотези, зокрема, застосування ФСА дає змогу істотно поліпшити фізико-механічні властивості металопрокату.

2. Слід продовжити експериментальні дослідження та моделювання можливого технологічного впливу ФСА на процеси видалення сірки, кремнію та фосфору із сталі 09Г2Д для поліпшення її властивостей під час гарячого цинкування.

Бібліографічний перелік

1. Швалева А. В. Методы математической статистики в технических исследованиях *Молодой ученый*. 2012. № 3. С. 427-430. URL <https://moluch.ru/archive/38/4467/> (дата обращения: 07.02.2020).
2. Гришенцев А. Ю. Теория и практика технического и технологического эксперимента /учебное пособие. Санкт-Петербург : СПбГУ ИТМО, 2010. 102 с.
3. Пономарев В. Б., Лошкарев В. Б. Математическое моделирование технологических процессов: курс лекций. Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. 129 с.
4. Винарский М. С., Жадан Т. В., Кулак Ю. Е. Математическая статистика в черной металлургии. Киев : Техніка, 1973. 220 с.

5. Быткин С. В., Литвин В. М. Конкурентная разведка во внешнеэкономической деятельности: инженерно-экономические методы. Харьков : Фактор, 2015. 240 с.
6. Мельниченко А. С. Статистический анализ в металлургии и материаловедении. Учебник. Москва : Изд-во Дом МИСиС, 2009. 268 с.
7. Горенский Б. М., Лапина Л. А., Любанова А. А. Моделирование процессов и объектов в металлургии. Версия 1.0 [Электронный ресурс]: конспект лекций / Красноярск : ИПК СФУ, 2008.
8. Тюрин Ю. Н., Макаров А. А. Анализ данных на компьютере: учебное пособие. Москва : МЦНМО, 2016. 368 с.
9. Быткин С. В. Экспериментально-статистическое моделирование применения радиационно-технологических процессов (РТП) для замедления деградации UOL биполярных интегральных микросхем (ИМС) в полях ионизирующих излучений. *Журнал физики и инженерии поверхности*. 2018. Т. 3. № 1. С. 24-34.
10. Мельник С. Г., Троцан А. И., Онищенко А. А., Белов В. Ф. О применении алюминийсодержащих ферросплавов для раскисления стали. *Литье и металлургия*. 2013. № 3(72). С. 204-206.
11. Ахметов А. Б. Влияние комплексного раскислителя на образование неметаллических включений в спокойных и низколегированных сталях. Труды XII Международной научной школы-конференции «Фундаментальное и прикладное материаловедение» / под ред. В. Б. Маркина. Барнаул : изд-во АлтГТУ, 2015. С. 9-13.
12. Юдакова В. А. Повышение качества стали при раскислении сплавом ферросиликоалюминий. Труды Международной научно-практической конференции «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации». Караганда : КГТУ, 2016. С. 15-17.
13. Белов В. Ф., Троцан А. И., Бродецкий И. Л., Крейденко Ф. С. Структурно-химическое состояние рафинировочных шлаков при ковшевой обработке стали. *Процессы литья*. 2015. № 1 (109). С.20-29.
14. Валуев Д. В. Внепечные и ковшовые процессы обработки стали металлургии: Учебное пособие. Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2010. 202 с.
15. Чичкарев Е. А., Назаренко Н. В., Исаев О. В., Кислица В. В. Математическое моделирование рафинирования стали от неметаллических включений при внепечной обработке и непрерывной разливке. *Математическое моделирование*. 2011. № 2 (25). С. 59-64.
16. Ахметов А. Б., Юдакова В. А. О физико-химических основах процессов раскисления и модифицирования стали комплексными сплавами. *Труды Карагандинского государственного технического университета*. 2015. № 1. С. 53-56.

References

1. Shvaleva A. V. Metody matematicheskoy statistiki v tekhnicheskikh issledovaniyakh *Molodoy uchenyy*. 2012. n.o 3. Pp. 427-430. URL <https://moluch.ru/archive/38/4467/> (data obrashxheniya: 07.02.2020).
2. Grishenkov A. Yu. Teoriya i praktika tekhnicheskogo i tekhnologicheskogo eksperimenta / uchebnoe posobie. Sankt-Peterburg : SPTU ITMO, 2010. 102 p.
3. Ponomarev V. B., Loshkarev V. B. Matematicheskoe modelirovanie tekhnologicheskikh protsessov: kurs lektsiy. Ekateriburg : GOU VPO UGPI UGTU-UI, 2006. 129 p.
4. Vinarskiy M. S., Zhadan T. V, Kulak Yu. E. Matematicheskaya statistika v chernoy metallurgii. Kiev : Tekhnika, 1973. 220 p.
5. Bytkin S. V., Litvin V. M. Konkurentnaya razvedka vo vneshneekonomicheskoy deyatel'nosti: inzhenerno-ekonomicheskir metody. Khar'kov : Faktor, 2015. 240 p.
6. Mel'nichenko A. S. Sratisticheskij analiz v metaluutgii i materualovedenii. Uchebnik. Moskva : Izdatel'stvo. Dom MISiS, 2009. 268 p.
7. Gorenskiy B. M., Lashina L. A., Lyubanova A. A. Modelirovanie protaessov i ob''ektov v metallurgii. Versiya 1.0 [Elektronnyy resurs]: konspekt lektsiy. Krasnoyarsk : IPK SFU, 2008.
8. Tyurin Yu. N., Makarov A. A. Analiz dannykh na kompyutere: uchebnoe posobie. Moskva : MTSNMO, 2016. 368 p.
9. Bytkin S. V. Eksperimental'no-statisticheskoe modelirivanie primeneniya radiatsionno-tekhnologicheskij protsessov (RTP) dlya zamedleniya degradatsii UOL bipolyarnykh integrakl'nykh

- mikroskhem (IMS) v polyakh ionizipuyushchikh izlucheniy. *Zhurnal fiziki i inzhenerii*. 2018. t. 3. no. 1. pp. 24-34.
10. Mel'nik S. G., Trotsan A. I., Onishchenko A. A., Belov V. Yu. O priminenii alyuminiysoderzhashchikh ferrospravkov dlya raskisleniya stali. *Lit'e i metallurgiya*. 2013. no. 3(72). pp. 204-206.
 11. Akhmetov A. B. Vliyanie kompleksnogo raskislitel'ya na obrazovanie nemetallicheskih vrlyucheniy v spokojnykh i nizkolegirovanykh stalyakh. Trudy XII Mezhdunarodnoy nauchnoy shkoly-konferentsii «Fundamental'noe i pkladnoe materialovedenie» / pod red. V. B. Markina. Barnaul: izdatel'stvo AltGTU, 2015. pp. 9-13.
 12. Yudakova V. A. Povyshenie kachestva stali pri raskislenii splavom ferrosilicoalyuminiy. Trudy Mezhdunarodnoy nauchno-practicheskoy konferentsii «Integratsiya nauki, obrazovaniya i proizvodstva – osnova realizatsii Plana natsii». Karaganda : KGTU, 2016. pp. 15-17.
 13. Velov B. F., Trotsan A. I., Brodetskiy I. L., Kreydenko F. S. Strukturno-khimicheskoe sostoyanie rafinirovochnykh shlakov pri kovshevoy obrabotke stali. *Protsessy lit'ya*. 2015. No. 1 (109). Pp. 20-29.
 14. Valuev D, V. Vnepechnye i kovshevye protsessy obrabotki stali v metallurgii: Uchebnoe posobie. Tomsk : Izdatel'stvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2010. 202 p.
 15. Chichkarev E. A., Nazarenko N. V., Isaev O. V., Kislitsa V. V. Matematischeskoe modelirovanie rafinirovaniya stali ot nemetallicheskih vklyucheniy pri vnepechnoy obrabotke i nepreryvnoy razlivke. *Matematischeskoe modelirovanie*. 2011. no. 2 (25). pp. 59-64.
 16. Akhmetov A. B., Yudakova V. A. O fiziko-khimicheskikh osnovnykh protsessov reaskisleniya i modifitsirovaniya stali kompleksnymi splavami. *Trudy Karagandinskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2015. no. 1. pp. 53-56.

Bytkin Sergey, department manager, candidate of technical sciences, PJSC «metallurgical combine «Zaporozhstal».

Krytskaya Tatiana, department head, doctor of technical sciences, Zaporozhe national university.

METHODOLOGY OF TECHNOLOGICAL EXPERIMENT RESULTS STATISTICAL EVALUATION IN FERROUS METALLURGY IN COMPUTING ENVIRONMENT OF STATISTICA AND MathCAD

To solve problems related to data analysis in the presence of random and / or unpredictable (unknown) factors (for example, different chemical composition of an array of metal melting data and the results of one experimental melt in the presence of a small variational series of measurements, stochastic, probabilistic methods are used. It make it possible to identify patterns against the background technological deviations (the mechanical properties of the samples, on which, for example, the yield point was measured, are associated not only with the chemical composition, but also with thermomechanical effects during rolling), make reasonable conclusions and predictions, give estimates of the probabilities of the numerical values of any other physical quantities by comparing not the individual numerical values of the characteristics of rolled metal, but their probabilities. The purpose of the present work was confirming the possibility of the STATISTICA, MathCAD applied packages use for the effectiveness confirmation of the application of the new technological solution (deoxidation using ferrosilicoaluminum, FSA). As an example, a statistical analysis of experimental data on experimental 09G2D melting considered. The distribution of the yield point σ_T for specimens made from standard 09G2D, as well as the distribution of the yield stress for specimens made from experimental steel 09G2D is investigated. Histograms (STATISTICA) describing the distribution of the standard technology σ_T and the same when using technology with FSA were approximated by the probability density distribution function of the numerical value of the feature. The resulting distributions were constructed in the MathCAD with a simultaneous transition to the probabilistic representation of dependencies. It was shown that the main effect of FSA use was the decrease of the σ_T dispersion of steel 09G2D.

Стаття надійшла: 08.10.2020 р.

УДК 66.074.6-047.37

DOI <https://doi.org/10.26661/2071-3789-2020-1-16>

Чейлитко Андрій Олександрович, завідувач кафедри, доктор технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-0513-155X

Ільїн Сергій Віталійович, керівник Центру післядипломної освіти, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-0200-0800

Лаврьонов Андрій Вікторович, магістрант, Запорізький національний університет

Белоконь Юрій Олександрович, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-9327-5219

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИКЛОНУ ДЛЯ СУХОГО ОЧИЩЕННЯ ГАЗІВ ВІД ПИЛУ В МЕТАЛУРГІЇ

Одержано головні аналітичні залежності, які необхідні для розробки методики виконання експериментів та розрахунків пиловловлювання для конкретних умов роботи. Досліджено методи розрахунків циклонів як вихрових апаратів та дослідження роботи циклону для очищення повітря від пилу. На основі використаних основних теоретичних положень з тепломасообміну та термодинаміки запропоновано математична модель. Виконано розрахунки нових конструкцій сучасних циклонів щодо отримання їх геометричних розмірів, опору та ефективності вловлювання пилу.

Ключові слова: сучасний циклон, екологічний стан, сухе очищення газів, пиловловлювання, математичне моделювання

Вступ. У зв'язку зі стратегією розвитку ООН, однією із чотирьох головних задач є екологія. В галузі теплоенергетики особливий інтерес набуває розробка та застосування нових, більш ефективних пилоочисних агрегатів, що забезпечують зменшення викидів до атмосфери та зберегти деякі цінні ресурси для виробництва. Відомо, що зі зростанням нововведень в технологічні підприємства збільшується кількість шкідливих викидів до атмосфери та погіршується екологічний стан навколишнього середовища.

Огляд літератури. На металургійних підприємствах здійснюють очищення повітря, що подають у цехи та відділи й видаляють з них до атмосфери, щоб уникнути забруднення зовнішнього повітря на території підприємства та житлових кварталів, що розташовано біля неї [1].

Знепилювальні пристрої є сухими та мокрими. Під час використання мокрих знепилювальних пристроїв спостерігають підвищення ефективності очищення повітря від пилу.

Одним із перспективних напрямків знешкодження газових викидів є каталітичний метод [2], сутність якого полягає в обробці відхідних газів на каталізаторі з метою перетворення токсичних компонентів на нешкідливі або отримання корисних продуктів за відносно низької температури та концентрації домішок, що видаляють. До каталізаторів очищення газів висувають дуже жорсткі вимоги – висока активність і вибірковість каталітичної дії, термостабільність, стійкість до дії отрути, малий газодинамічний опір, що не дозволяє їх використовувати для очищення пилу та інших домішок у технологічних газах виробництва металургійних підприємств.

До теперішнього часу розроблено як теоретичні основи вловлювання пилу та газових компонентів, так і методи розрахунку різноманітної апаратури для цих цілей.

Існує декілька технологій очищення від пилу, де особливу увагу приділяють застосуванню циклонного очищення повітря. Найбільш достовірні результати можна отримати завдяки експериментальним дослідженням, які виконують на фізичних моделях. Більш спільні результати можливо отримати за використанням математичної моделі гідромеханічних процесів циклонів. Створення математичної моделі руху частинок пилу в закрученому по-

тоці дозволить оцінити вплив різних факторів на ефективність управління пилу в циклонах [3].

Для визначення характеру руху частинок, які транспортують потоком у закручених пилоповітряних потоках, та осадження їх на твердій поверхні використовують метод розрахунків газодинамічних потоків, який комбінує властивості ейлерового та лагранжевого підходів та дає змогу певною мірою усунути недоліки кожного, котрий має назву метод «частинок у комірі» [4]. На характер руху частинок значно впливають умови їх контакту під час удару з поверхнею корпусу пиловловлювача, а за достатньо значних швидкостей руху можливим є явище відбиття частинок пилу. Математичне моделювання процесу сепарації відображає взаємозв'язок процесу руху твердих частинок в апараті з його ефективністю, що дає змогу отримати траєкторію їх руху на різних ділянках апарата, за якою розраховують його ефективність для кожного типу пилу, та як наслідок для кожного типу аерозолу, маючи різні конструктивні параметри пиловловлювачів, теоретично підбирати найбільш ефективну конструкцію для кожного конкретного типу технологічного виробництва [5].

Відомою є нова циклонна установка [6], що має рельєфну поверхню з відривними зонами та зверненим догори усіченим конусом, яка характеризується меншим, у два рази, аеродинамічним опором порівняно з гладкостінними апаратами. Зниженню гідравлічного опору циклону сприяє наявність відривних зон на рельєфних поверхнях. Моделювання турбулентної течії газу в пиловловлювачі нового типу показує, що розрахунки картини перебігу в циклоні якісно задовільно узгоджуються з експериментальними даними; чисельні значення енергії турбулентних пульсацій для гладкостінних апаратів і нового типу циклонів задовільно узгоджуються з експериментальними даними по ефективності пиловловлювання цих пиловловлювачів. Зниження гідравлічного опору циклону з внутрішніми елементами порівняно з гладкостінними апаратами відбувається внаслідок перебудови течії: зменшення тангенціальної швидкості з одночасним збільшенням аксіальної швидкості потоку.

Для очищення повітря від пилу, що видаляється витяжною вентиляцією, застосовують пиловловлювачі і фільтри [7].

До пиловловлювачів відносять пилоосаджувальні камери, інерційні пиловловлювачі та циклони. Найбільш простим пиловловлювачем для очищення повітря, що видаляють, є пилоосаджувальні камери, робота яких заснована на осадженні пилинок з повітря за малої швидкості його руху ($\sim 0,1$ м/с).

У жалюзійних пиловловлювачах, пил виділяють з газового потоку зад дією інерційних сил під час змінювання напрямку руху газового потоку. За допомогою жалюзійних пластин, встановлених у газоході, потік газу поділяється на дві частини: один потік складає 80...90% всієї кількості газу та в значній мірі звільнений від пилу другий становить 10...20% і в ньому зосереджено головну масу пилу, що потім вловлюють у циклоні або в іншому, досить ефективному пиловловлювачі. Рух газу через циклон здійснюється за перепадом тиску на жалюзійній решітці.

З інерційних апаратів найбільшого поширення набули циклони які є більш ефективними та менш коштовними пиловловлювачами для грубого очищення газів, що видаляють. Такий вид пиловловлювача значно відрізняється від пилоосаджувальних камер як в конструктивному відношенні, так і за принципом дії.

Циклони набули широкого поширення та застосовуються для затримування стружки та металевого пилу. Запилене повітря підводиться вентилятором у верхню частину зовнішнього циліндра циклону.

В циклоні повітря приймає обертальний рух, внаслідок чого розвивається відцентрова сила, механічні домішки відкидаються до стінок, звідки вони прямують до нижньої частини циклону, що має форму усіченого конуса. Очищене повітря через внутрішній ци-

ліндр циклону, так звану вихлопну трубу, виходить з циклону. Нижню частину циклону періодично очищують.

В циклоні типу Ліот відділення пилу від повітря відбувається з використанням відцентрових сил, які виникають в обертовому потоці запиленого повітря, що опускається за гвинтовою лінією. Частинки пилу віджимаються до стінок і спускаються вниз. Повітря, яке пройшло очистку, виходить через центральну трубу. Ефективність очищення складає до 85% [8].

На теплових станціях для попереднього очищення в комплексі з іншими методами золовловлювання встановлюють мультициклони.

Мультициклон є об'єднанням в одному агрегаті багатьох маленьких циклонів діаметром 300...400 мм із загальним подаванням до них забрудненого повітря та загальним бункером для золи, яка осіла. У мультициклоні затримується до 65...70% золи [9].

Інтерес представляють пиловловлювачі мокрого типу, які відрізняються доброю ефективністю. До них відносяться відцентрові скрубери, циклони-промивачі, пиловловлювачі Вентурі та пінні пиловловлювачі.

Фільтри є пристроями, де запилене повітря очищають, пропускаючи його через сітчасті або пористі матеріали (скляну вату, гравій, кокс, пористий папір, тканину, металеву сітку) [10].

Також слід відзначити електрофільтри та ультразвукові пиловловлювачі. Принцип дії електрофільтру заснований на отримуванні пиловими частинками електричних зарядів під час проходження з повітрям через електричне поле, та подальшого осідання на електродах, з яких потім видаляються механічним способом [11].

В ультразвукових пиловловлювачах використовують здатність пилових частинок під дією потужного звукового потоку до коагуляції, тобто до згортання в пластівці, що дуже важливо для уловлювання з повітря аерозолів [12]. Такі пластівці випадають у бункер. Звуковий ефект створюється сиреною, які можуть бути застосованими у пилоочисних установках продуктивністю до $15 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{год}$.

Постановка проблеми. Описані пристрої для очищення повітря, цехів і відділів металургійних підприємств, що видаляють витяжною вентиляцією до атмосфери, далеко не вичерпують всі види пиловловлювачів і фільтрів, які використовують для запобігання забруднення повітряного басейну міст.

Незважаючи на існуюче різноманіття очисних апаратів на даний час для очищення газів від пилу найбільшого поширення знайшли циклони завдяки їх низькій вартості, простоті та зручності експлуатації. У зв'язку з цим розробка перфорованого циклону потребує виконання досліджень, спрямованих на підвищення ступеня вловлювання пилу з газів, що і розглядається в даній роботі.

Головна частина досліджень. Розрахунки циклонів передбачають визначення їх геометричних розмірів, опору та ефективності уловлювання пилу.

Нині найбільш поширеним методом розрахунків циклонів є метод узагальнення та використання показників, отриманих під час випробування циклонів за промислових умов або на стендах.

Метод розрахунків циклонів з використанням дослідних даних засновано на визначенні діаметра циклону за формулою [13]

$$D_c = \left(\frac{Q_z}{900 \cdot \pi \cdot W_{ym}} \right)^{0,5}, \quad (1)$$

де Q_z – об'ємна витрата газу через циклон, $\text{м}^3/\text{год}$.; W_{ym} – умовна видаткова швидкість газу в циклоні, $\text{м}/\text{с}$.

Опір циклону визначають з використанням рівняння

$$\Delta P = 0,5 \xi_0 \cdot W_{ym}^2 \cdot \rho, \quad (2)$$

де ΔP – перепад тиску в циклоні, Па; ξ_0 – загальний коефіцієнт опору циклону, або

$$\Delta P = 0,5 \xi_0 \cdot \frac{W_{ym}^2 \cdot \gamma}{g}, \quad (3)$$

де γ – питома вага газу, кг/м³; g – сила вільного падіння частинки пилу, кг/с².

Швидкість газу W_{ex} у вхідному патрубку циклона обчислюють за формулою

$$W_{ex} = \left(\frac{2 \cdot \Delta P}{\xi_{ex} \cdot \rho} \right)^{0,5}, \quad (4)$$

де ξ_{ex} – вхідний коефіцієнт опору циклону.

Значні обсяги викидів і низькі коефіцієнти корисної дії циклонів призвели до суттєвої залишкової запиленості атмосфери, що потребує як розробки нової конструкції даних агрегатів, так і нових теоретичних вирішень і систем знепилювання газів. Так у роботі [14] знайдено узагальнюючий конструктивний параметр циклонів $K = \Sigma f / (\pi \cdot R_0 \cdot R_{mp} \cdot \cos \beta)$ і визначено його оптимальне значення, що забезпечує максимум коефіцієнта корисної дії циклону, а також отримано аналітичну залежність, що характеризує довжину вихрової камери L_{max} , що є необхідною для уловлювання мінімальних частинок пилу d_{min} .

$$L_{max} = \frac{9D_u \cdot K}{\varepsilon^2} \cdot \frac{\mu}{\rho_m} \cdot \frac{R_u}{R_0} \cdot \frac{1}{W_0} \cdot \frac{\left(\frac{R_{mp}}{R_u} \right)^4 \cdot \frac{1}{\cos \beta}}{\left[1 + \frac{R_{mp}}{R_u} + \left(\frac{R_{mp}}{R_u} \right)^3 + \left(\frac{R_{mp}}{R_u} \right)^4 \right] \cdot d_{min}^2}, \quad (5)$$

де Σf – сумарна площа патрубків підведення потоку повітря з пилом, м²; R_0 – плече закручування (відстань від осі патрубка підведення до осі обертання циклону); R_{mp} – внутрішній радіус труби циклону, що відводить β – кут закручування потоку повітря з пилом, град.; D_u – внутрішній діаметр циклону, м; μ – коефіцієнт динамічної в'язкості повітря, якого очищують, Па·с; W_0 – швидкість руху потоку повітря, м/с; ρ_m – дійсна щільність частинки пилу, кг/м³.

Під час розробки великогабаритних циклонів їх здатність до уловлювання пилу може бути визначеною на моделі менших розмірів, що потребує наявності треба мати залежності, які дозволяють виконати перерахунок з фізичної моделі на натуральний об'єкт.

Використовуючи залежність (5), визначимо розмір пилинки, яка буде уловленою циклоном на довжині L його камери

$$d_{min} = \frac{3D_u}{\varepsilon} \cdot \left(\frac{\mu}{\rho_m} \cdot \frac{1}{W_0} \cdot \frac{K \cdot \frac{R_u}{R_0} \cdot \left(\frac{R_{mp}}{R_u} \right)^4}{\left[1 + \frac{R_{mp}}{R_u} + \left(\frac{R_{mp}}{R_u} \right)^3 + \left(\frac{R_{mp}}{R_u} \right)^4 \right] \cdot L_{max} \cdot \cos \beta} \right)^{0,5}, \quad (6)$$

де ε – коефіцієнт зменшення моменту кількості руху від входу в циклон до виходу з газо-відвідної труби.

Швидкість руху потоку газу (повітря з пилом) на виході з патрубка підведення визначають за формулою

$$W_0 = \left(\frac{2\Delta P}{\xi_{\text{ex}} \cdot \rho_2} \right)^{0,5}, \quad (7)$$

де ρ_2 – щільність газу, що очищують; ξ_{ex} – коефіцієнт опору циклону, який визначається наступним чином:

$$\xi_{\text{ex}} = \left[\frac{\frac{R_0}{R_y} \cdot \cos \beta}{\frac{R_{mp}}{R_y} \cdot \left(1 - K \cdot \frac{1}{4 \operatorname{tg} \alpha_1} \cdot \frac{1}{\varepsilon} \right) \cdot \cos \alpha_1} \right]^2$$

Підставляючи значення W_0 та ξ_{ex} до формули (6) й виконуючи відповідні перетворення, отримаємо залежність, що визначає зв'язок між геометричними розмірами циклону та його здатністю вловлювати частинки пилу діаметром d_{\min} таким чином:

$$d_{\min} = \frac{3D_y}{\varepsilon \cdot \left(\frac{2\Delta P}{\rho_2} \right)^{0,25}} \cdot \left(\frac{\mu}{\rho_m} \cdot \frac{K}{\left(1 - K \cdot \frac{1}{4 \operatorname{tg} \alpha_1} \cdot \frac{1}{\varepsilon} \right) \cdot \cos \alpha_1} \cdot \frac{\left(\frac{R_{mp}}{R_y} \right)^4}{\left[1 + \frac{R_{mp}}{R_y} + \left(\frac{R_{mp}}{R_y} \right)^3 + \left(\frac{R_{mp}}{R_y} \right)^4 \right] \cdot L_{\max}} \right)^{0,5} \quad (8)$$

Для геометрично подібних циклонів на основі формули (8) можна записати

$$\frac{d_{\min}}{D_y} = \frac{C}{\varepsilon} \cdot \left(\frac{\rho_2}{2\Delta P} \right)^{0,25} \cdot \left(\frac{\mu_2}{\rho_m} \right)^{0,5} \cdot \left(\frac{1}{L} \right)^{0,5}, \quad (9)$$

де

$$C = \operatorname{const} = 3 \cdot \left(\frac{K}{\left(1 - K \cdot \frac{1}{4 \operatorname{tg} \alpha_1} \cdot \frac{1}{\varepsilon} \right) \cdot \cos \alpha_1} \cdot \frac{\left(\frac{R_{mp}}{R_y} \right)^4}{\left[1 + \frac{R_{mp}}{R_y} + \left(\frac{R_{mp}}{R_y} \right)^3 + \left(\frac{R_{mp}}{R_y} \right)^4 \right]} \right)^{0,5}$$

Із залежності (10) визначимо константу C

$$C = \frac{d}{D_y} \cdot \varepsilon \cdot \left(\frac{2\Delta P}{\rho_2} \right)^{0,25} \cdot \left(\frac{\rho_m}{\mu_2} \right)^{0,5} \cdot (L_{\max})^{0,5}. \quad (10)$$

Для двох подібних циклонів, з яких один позначено індексом 1, а другий – індексом 2 можна записати

$$\frac{d_1}{D_{y1}} \cdot \varepsilon_1 \cdot \left(\frac{2\Delta P_1}{\rho_{21}} \right)^{0,25} \cdot \left(\frac{\rho_{m1}}{\mu_{2a1}} \right)^{0,5} \cdot (L_1)^{0,5} = \frac{d_2}{D_{y2}} \cdot \varepsilon_2 \cdot \left(\frac{2\Delta P_2}{\rho_{22}} \right)^{0,25} \cdot \left(\frac{\rho_{m2}}{\mu_{22}} \right)^{0,5} \cdot (L_2)^{0,5}. \quad (11)$$

Звідки частинка пилу, яку вловлюють у першому циклоні, визначиться розміром пилу, вловленого у другому циклоні, за наступним співвідношенням

$$d_1 = d_2 \cdot \frac{D_{y1}}{D_{y2}} \cdot \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \cdot \left(\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1}\right)^{0.25} \cdot \left(\frac{\rho_{z1}}{\rho_{z2}}\right)^{0.25} \cdot \left(\frac{\rho_{m2}}{\rho_{m1}}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{\mu_{z1}}{\mu_{z2}}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{L_2}{L_1}\right)^{0.5} \quad (12)$$

Оскільки $\mu = \rho \cdot \nu$, то

$$\left(\frac{\rho_{z1}}{\rho_{z2}}\right)^{0.25} \cdot \left(\frac{\rho_{z1}}{\rho_{z2}}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{\nu_1}{\nu_2}\right)^{0.5} = \left(\frac{\rho_{z1}}{\rho_{z2}}\right)^{0.75} \cdot \left(\frac{\nu_{z1}}{\nu_{z2}}\right)^{0.5}$$

тоді

$$d_1 = d_2 \cdot \frac{D_{y1}}{D_{y2}} \cdot \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \cdot \left(\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1}\right)^{0.25} \cdot \left(\frac{\rho_{z1}}{\rho_{z2}}\right)^{0.75} \cdot \left(\frac{\rho_{m2}}{\rho_{m1}}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{\nu_{z1}}{\nu_{z2}}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{L_2}{L_1}\right)^{0.5}, \quad (13)$$

або

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{D_{y1}}{D_{y2}} \cdot \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \cdot \left(\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1}\right)^{0.25} \cdot \left(\frac{P_{z1}}{P_{z2}}\right)^{0.75} \cdot \left(\frac{T_{z2}}{T_{z1}}\right)^{0.75} \cdot \left(\frac{\mu_1}{\mu_2}\right)^{0.75} \cdot \left(\frac{\rho_{m2}}{\rho_{m1}}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{\nu_{z1}}{\nu_{z2}}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{L_2}{L_1}\right)^{0.5} \quad (15)$$

Якщо під індексом 2 позначити модельний циклон, а під індексом 1 – його натуральний варіант, то результати випробувань модельного циклону з уловлювання пилу діаметром d_2 можна перерахувати на уловлювання пилу діаметром d_1 за допомогою натурального циклону за залежністю (13).

Висновки. Як результат теоретичних досліджень визначено аналітичні залежності головних параметрів циклону, що дають змогу виконати їх експериментальні дослідження та розробити методику розрахунку циклонів нової конструкції, що дозволить конструювати пиловловлювачі з максимальним коефіцієнтом корисної дії для конкретних умов роботи.

Бібліографічний перелік

1. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. Москва : ГИТТЛ, 1953. 736 с.
2. Середа Б. П., Кожемякин Г. Б., Рыжков В. Г., Белоконь К. В. Влияние состава никель-алюминиевого сплава с добавками кобальта, марганца и меди на структуру и удельную активность катализатора на их основе / *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Сер. Стародубовские чтения*. 2009. Вып. 48. С. 101-104.
3. Вязовский Е. С., Николаев Н. А. Особенности движения капель жидкости в массообменных аппаратах вихревого потока. *Известия Вузов. Химия и химическая технология*. 1972. Т. 15. С. 936-942.
4. Жук П. Ф., Юрчук І. А. Математичні методи в аеродинаміці: Навчальний посібник. Київ : НАУ, 2013. 315 с.
5. Волков Е. В., Суслов С. М. Об аэродинамическом сопротивлении циклонных камер при циркуляции твердой дисперсной фазы в ее объеме. *Труды УПИ*. Свердловск. 1974. Вып. 227. С. 58-60.
6. Чейлытко А. А., Павленко А. М. Особенности гидродинамики дисперсного потока в вихревых камерах. *Збірка наукових праць ДДТУ*, 2010. № 11. С. 76-82.
7. Vatin N. I., Sagittarius K. I. Air purification using cyclone type apparatuses. *Young Scientist*. 2017. Is. 13. P. 165-168.
8. Shelukh Yu. E. Modern methods of air purification from industrial types of dust. *Journal «Heat power»*. 2012. Is. 10. P. 146-174.
9. Malgin A. D., Scriabin G. M. Purification of gases and air from dust in the chemical industry. *Journal of Modern High Technology*. 2019, Is. 12. P. 199-203.

10. Асламова В. С. Автоматизация расчетов пылеуловителей. *Известия Томского политехнического университета*. 2008. № 6. С. 28-31.
11. Асламова В. С. Автоматизированная система исследования циклонов и скрубберов. *Известия Томского политехнического университета*. 2010. № 8. С. 43-49.
12. Naumkin A. The characteristic and separation effects in a cylindrical cyclone dust collector. International Youth Scientific Conference on Heat and Mass Transfer in the Thermal Control System of Technical and Technological Energy Equipment, 2017; Tomsk; Vol. 110. Pp. 126-127.
13. Голубцов В. М. Расчет угла крутки на выходе из вихревых газовых горелок. *Газовая промышленность*. 1976. № 7. С. 26-32.
14. Голубцов В. М. К расчету числа лопаток завихрителей вихревых горелочных устройств. *Теплоэнергетика*. 1988. № 3. С. 73-75.

References

1. Abramoich G. N. *Prikladnaya gazovaya dinamika*. Moskva : GITTL, 1953. 736 p.
2. Sereda V. P., Kozhemyakin G. B., Ryzhkov V. G., Belokon K. V. Stroitel'stvo. Vliyanie sostava nikel'-aluminievogo splava s dobavkami kobal'ta, margantsa i medi na strukturu i udel'nuyu aktivnost' katalizatora na ikh osnove / *Materialovedenie. Mashinostroenie. Ser. Staroduboskie chteniya*. 2009. vol. 48. pp. 101-104.
3. Vyazovski E. S., Nikolaev N.A. Osobennosti dvizheniya kapel' zhidkosti v massoobmennyykh apparatakh vikhrevoogo potoka. *Ivestiya Vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*. 1972. t. 15. pp. 936-942.
4. Zhuk P. F., Uyrchuk I. A. Matematychni metody i aerodynamitsi: Navcchal'ny posibnyk. Kyiv : NAU, 2013. 315 p.
5. Volkov E. V., Suslov S. M. Ob erodinamicheskom coprotivlenii tsiklonnykh kamer pri tsirkulyatsii pri tverdoy dispersnoy fazy v ob'eme. *Trudy UPI. Sverdlovsk*. 1974. vol. 227. pp. 58-60.
6. Cheilytko A. A., Pavlenko A. M. Osobennosti gidrodinami dispersnogo potoka v vikhrevykh kamerakh. *Zbirka naukovykh prats' DDTU*, 2010. no 11. pp. 76-82.
7. Vatin N. I., Sagittarius K. I. Air purification using cyclone type apparatuses. *Young Scientist*. 2017. vol. 13. pp. 165-168.
8. Shelukh Yu. E. Modern methods of air purification from industrial types of dust. *Journal «Heat power»*. 2012. no. 10. pp. 146-174.
9. Malgin A. D., Scriabin G. M. Purification of gases and air from dust in the chemical industry. *Journal of Modern High Technology*. 2019. no. 12. pp. 199-203.
10. Aslamova V. S. Avtomatizatsiya raschetov pyleuloviteley. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universitets*. 2008. no. 6. pp. 28-31.
11. Aslamova V. S. Avtomatizirovannaya sistema issledovaniya tsiklonov i skrubberov. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universitets*. 2008. 2010. no. 8. pp. 43-49.
12. Naumkin A. The characteristic and separation effects in a cylindrical cyclone dust collector. International Youth Scientific Conference on Heat and Mass Transfer in the Thermal Control System of Technical and Technological Energy Equipment, 2017; Tomsk. vol. 110. pp. 126-127.
13. Golubtsov V. M. Raschet ugla krutki na vykhode iz vikhrevykh gazovykh girelok. *Gazovaya promyshlennost'*. 1976. no. 7. pp. 26-32.
14. Golubtsov V. M. K Raschetu chisla lopatok zavikhriteley vikhrevykh gorelokhnykh ustroystv. *Teplenergetika*. 1988. no 3. pp. 73-75.

Cheilytko Andrii, head of the department, doctor of technical sciences, Zaporizhia national university.

Il'in Sergii, head of the center for postgraduate education, candidate of technical sciences, Zaporizhia national university.

Lavryonov Andrii, undergraduate, Zaporizhia national university.

Belokon Yurii, Associate professor, candidate of technical sciences, Zaporizhia national university.

**RESEARCH OF CYCLONE DESCRIPTIONS FOR GRY CLEANING OF GASES
FROM DUST IN METALLURGY**

In the field of heat energy, the development and application of new, more efficient dust cleaning units, which reduce emissions into the atmosphere and preserve some valuable resources for production, are of particular interest. It is known that with the growth of innovations in technological enterprises, the number of harmful emissions into the atmosphere increases and the ecological state of the environment deteriorates. The development and application of new, more efficient dust collection units that will help reduce emissions into the atmosphere and save some very valuable resources for production is an urgent area of scientific research. With the growth of innovation in technological enterprises, the amount of harmful emissions into the atmosphere increases. The ecological state of the environment is also deteriorating. The main analytical dependencies have been developed, which are necessary for constructing a methodology for conducting experiments and calculating dust collection for specific operating conditions. Methods for calculating cyclones as vortex devices and the study of the operation of a cyclone for cleaning air from dust were investigated. On the basis of the basic theoretical principles of heat and mass transfer and thermodynamics used during analytical research, a mathematical model was proposed. Calculations of new designs of modern cyclones were presented to obtain their geometric dimensions, resistance and efficiency of dust collection. Modern cyclones are designed to more efficiently remove dust from the air in a variety of applications. As a result of theoretical research, the analytical dependences of the main parameters of the cyclone are determined, which allow to perform their experimental studies and develop a method of calculating cyclones of new design, which will design dust collectors with maximum efficiency for specific operating conditions.

Стаття надійшла: 02.10.2020 р.

УДК 621.784-047.37

DOI <https://doi.org/10.26661/2071-3789-2020-1-17>

Тарасов В'ячеслав Кирилович, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет. ORCID: 0000-0002-4404-3454

Воденнікова Оксана Сергіївна, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет. ORCID: 0000-0003-0496-5435

Воденніков Сергій Анатолійович, професор, доктор технічних наук, Національний університет «Запорізька політехніка». ORCID: 0000-0002-5563-5244

Лисенко Єгор Іванович, студент, Запорізький національний університет

Макушина Мілана Михайлівна, студент, Міжнародний гуманітарний університет, м. Одеса

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ БОРТОВИХ ВІДСМОКТУВАЧІВ ТРАВІЛЬНИХ ВАНН

За умов травильного відділення ВАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь», для відведення з технологічних ванн аерозолів запропоновано двохбортіві відсмоктувачі. Проаналізовано вплив розмірів травильних ванн та температури виробничого середовища на продуктивність зазначених агрегатів. Встановлено, що допустима температура повітря робочої зони у травильному відділенні для холодної та теплої пори року складає відповідно 290...296 К та 291...300 К, при цьому зростання температури повітря навколо ванни з 289 К до 313 К знижує продуктивність вентиляції на 71%. Збільшення ширини травильної ванни на 0,6 м підвищує продуктивність вентиляції на 48%, тому за доцільний діапазон ширини ванни обрано інтервал 0,9...1,2 м.

Ключові слова: травильна ванна, окалина, пари кислот, бортові відсмоктувачі, витяжна вентиляція

Постановка проблеми. Для отримання високої якості поверхні холоднокатаних листів одним з першочергових завдань є видалення окалини з поверхні гарячекатаної штабової сталі. Ефективність видалення окалини залежить від її хімічного складу, структури, товщини та умов травлення. Процес травлення металу засновано на взаємодії окалини з кислотами (сірчаною або соляною) шляхом занурення металу до ванни або подаванням струменів розчину під тиском. Важливими характеристиками, що прискорюють процес травлення окалини є її суцільність (пористість) та наявність тріщин [1]. Механізм взаємодії травильного розчину з окалиною детально описано у роботах [2-5].

Під час травлення штаб з поверхні ванн виділяються шкідливі та небезпечні пари кислот, що забруднюють виробниче та навколишнє середовище, суттєво підвищують втрати на вартості кислоти, що не утилізовано. Саме тому виникає проблема підвищення герметичності травильних ванн, дослідження характеру роботи різних систем уловлювання парів кислот у травильному відділенні.

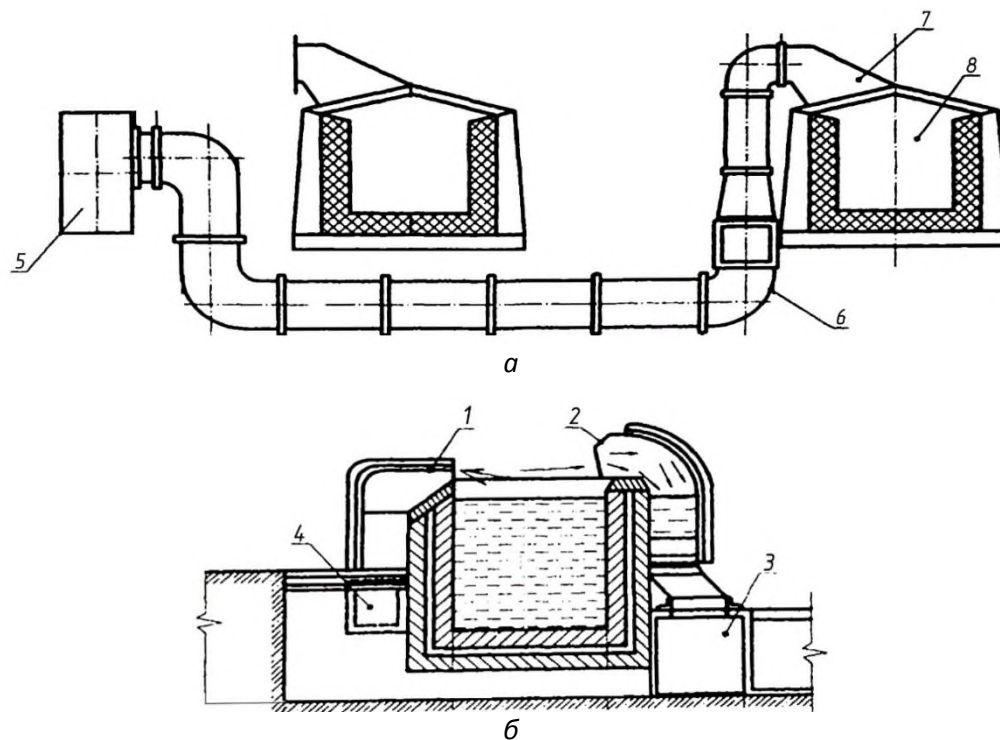
Аналіз останніх досліджень і публікації. Відомо, що одним з основних технічних засобів, які запобігають потраплянню шкідливих речовин до повітря робочої зони, є місцеві відсмоктувачі, тобто пристрої для забирання шкідливих речовин від технологічного обладнання або місць їх утворення [6]. Так, бортові відсмоктувачі набули широкого поширення в гальванічних цехах під час знежирювання та травлення металу перед нанесенням антикорозійних та декоративних покриттів, до яких відносять процеси цинкування, хромування, нікелювання та інші [7].

Питанню оцінювання впливу небезпечних та шкідливих факторів та ефективності технічних засобів захисту повітря термічних цехів присвячено роботи [8] та [9].

Згідно НПАОП 28.0-1.03-08 [10] для ефективного поглинання парів сірчаної кислоти, які виділяються з травильних ванн, потрібно застосовувати спеціальні фільтри, наприклад ФВГ-Т-3,2. Очищення повітря в кабінах машиніста кранів травильного відділення

здійснюють за допомогою фільтра аерозольного типу (касети) з фільтрувальним матеріалом з ультратонких полімерних волокон.

У роботі [11] для уловлювання шкідливих речовин, що виділяються з поверхні деталей, що обробляють, під час видавання їх з травильної ванни, запропоновано застосувати панелі, що відсмоктують, які встановлюють на рівні, який відповідає рівню підвищення вийнятих з ванни деталей.



- 1 - бортове відсмоктування; 2 - бортовий відсмоктувач з регулюючим пристроєм; 3 - залізобетонний відсмоктуючий комплекс; 4 - канал для відсмоктування; 5 - вентилятор;
6 - повітропровід; 7 - зонт; 8 - травильна ванна

Рисунок 1 – Схема травильної ванни з видаленням парів кислот з боку (а) та з торців ванни (б)

Авторами роботи [12] запропоновано спосіб підігрівання травильного розчину сірчаної кислоти у виносних графітових теплообмінниках насиченою парою, що дає змогу регулювати температуру розчину та концентрацію сірчаної кислоти в ньому.

З метою забезпечення необхідної кількості об'ємної витрати повітря, що уловлюють від ванн, для дотримання пропускної концентрації шкідливих речовин у робочій зоні приміщень гальванічних цехів в роботі [7] виконано порівняльний аналіз методик розрахунку бортових відсмоктувачів.

Постановка завдання. Метою роботи є аналіз впливу параметрів травильних ванн та температури виробничого середовища на продуктивність двохбортових відсмоктувачів.

Викладення матеріалу та результати. За умов травильного відділення для видалення та утилізації парів сірчаної або соляної кислот використовують витяжну, припливну та загальнообмінну вентиляції. Загальнообмінну вентиляцію використовують для покращення складу повітря в приміщенні, тобто подають додатково чисте повітря з допомогою припливної вентиляції. Під час використання сірчаної кислоти на безперервному травильному агрегаті встановлюють пристрій відсмоктування зверху укриття (рис. 1,а). Недоліком такої конструкції є значне винесення парів розчину. У разі застосування соляної кислоти, яка випаровується у багато разів інтенсивніше ніж сірчана, проектують конструкції відсмоктування парів з розрахунком на мінімальне винесення парів.

Схеми укриття травильної ванни з розчином соляної кислоти передбачають відсмоктування газів, що виділяються з нещільності укриття в торцях агрегату, а також у місцях входу і виходу штаби з агрегату (рис. 1,б). Система вентиляції забезпечує створення розрідження, що перешкоджає виділенню парів води до навколишнього середовища. Тому всю систему, починаючи від укриття до ванни труби, через яку викидають до атмосфери відпрацьоване повітря, слід захищати кислотостійкою ізоляцією або виконуватися з полімерів, стійких до різних кислот та агресивних середовищ.

Під час виконання конструкції з полімерів потрібно враховувати, що елементи системи повинні бути розвантаженими шляхом розміщення металевих опор. Серед вдалих вирішень потрібно виділити розміщення травильного агрегату піднятим над рівнем підлоги на 3...4 м.

У травильних відділеннях металургійних підприємств для відводу з технологічних ванн аерозолів, що утворюються, використовують примусове газовиділення за рахунок створення розрідження над поверхнею дзеркала ванни, яке забезпечують за допомогою одно- або двохбортових відсмоктувачів. Однобортові відсмоктувачі застосовують для вільно розташованих ванн, двохбортові – для ванн з обмеженим розташуванням біля стін приміщення травильного відділення [11].

Кількість повітря, яке видаляється за допомогою одно- та двохбортових відсмоктувачів, визначають залежно від ширини та висоти травильної ванни; рівня рідини (кислоти) у ванні, рухливості повітря у приміщенні та різниці температур розчину та навколишнього повітря.

Однобортові відсмоктувачі застосовують для травильних ванн шириною 600...800 мм. За ширини травильних ванн 800...1000 мм перевагу надають двохбортовим відсмоктувачам, а за ширини понад 1000 мм – бортовому відсмоктувачу з передуванням на поверхні ванни.

Слід зазначити, що чим більш токсичним є виділення парів з поверхні розчину, тим ближче до рівня розчину в травильній ванні потрібно розташовувати щілини, щоб не припустити потрапляння небезпечних та шкідливих речовин до зони знаходження робітників.

На сьогодні за умов ВАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь» встановлено безперервно-травильний агрегат БТА-4 продуктивністю близько 1350 тис. тонн на рік травленого металу, що дає змогу повністю припинити викиди парів сірчаної кислоти та скидання промислової води до річки Дніпро та перейти на соляно-кислотне травлення. В зв'язку з цим для відведення шкідливих парів кислот з технологічних ванн доцільно використовувати двохбортові відсмоктувачі.

Для обчислень продуктивності витяжної вентиляції в травильному відділенні використовуємо методика, що запропонована у роботі [13]. Під час розрахунків параметрів витяжної вентиляції приймаємо двохбортовий тип відсмоктувача, довжину травильної ванни 5...8 м, ширину ванни 0,8...1,4 м, температуру рідини у ванні 333 К та температуру повітря навколо ванни 289...313 К.

Визначаємо кількість теплоти, що виділяється з ванни до навколишнього середовища за формулою

$$Q_0 = \alpha \cdot (T_p - T_{нов}) \cdot \frac{a \cdot \ell}{1000}, \quad (1)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією, Вт/(м² К), $\alpha = 2,05 \sqrt[3]{(T_p - T_{нов})}$; $T_p, T_{нов}$ – температура рідини у ванні та температура повітря навколо ванни, К, відповідно; ℓ, b – довжина та ширина ванни, м, відповідно.

Продуктивність вентиляції V_n за середньої швидкості підйому аерозолі над ванною за рахунок конвективних потоків U визначають як

$$V_n = U \cdot a \cdot \ell, \quad (3)$$

$$U = 0,155 \sqrt[3]{Q_0} . \quad (4)$$

Аналіз розрахункових даних щодо продуктивності системи витяжної вентиляції в травильному відділенні (рис. 2) показав, що її збільшення прямо пропорційно залежить від зростання значень ширини та довжини травильної ванни, що пов'язано з підвищенням площі відкритої поверхні. Обрано доцільний діапазон ширини травильної ванни у межах 0,9...1,2 м.

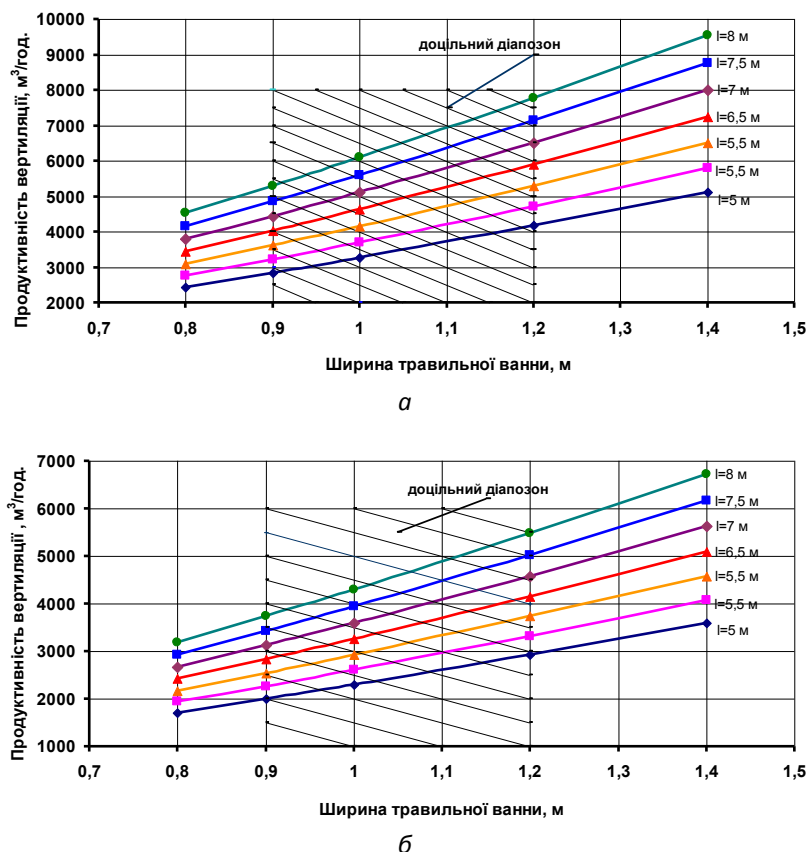


Рисунок 2 – Залежність продуктивності вентиляції в травильному відділенні від ширини травильної ванни за температури повітря навколо ванни 289 К (а) та 313 К (б)

Вибирання допустимої температури повітря навколо травильної ванни повинен відповідати умовам мікроклімату виробничої зони травильного відділення. Згідно ДСН 3.3.6.042-99 [14] допустима температура повітря робочої зони в травильному відділенні складає 290...296 К у холодний період року та 291...300 К у теплий період року за однакових параметрів ванни потрібна продуктивність вентиляції в холодну пору року на 29,4% вища ніж у його теплу пору.

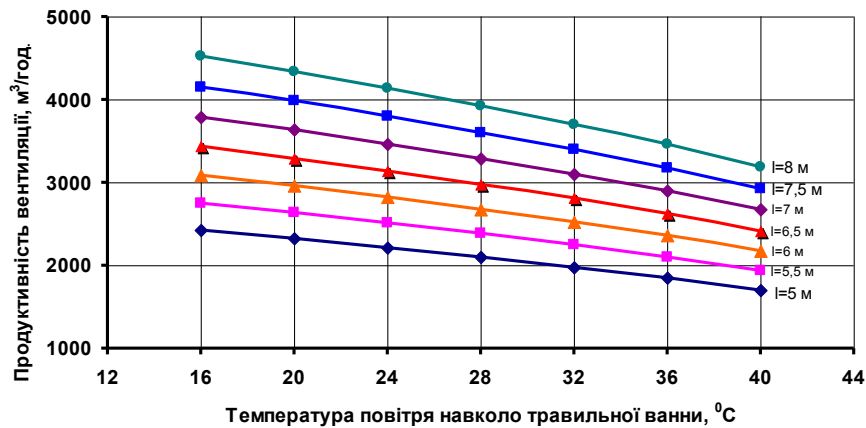
Як показав аналіз залежності продуктивності вентиляції в травильному відділенні від температури повітря навколо ванни (рис. 3), зростання температури від 293 К до 313 К прямо пропорційно знижує продуктивність вентиляції на 71%, при цьому збільшення ширини ванни з 0,8 м до 1,4 м підвищує продуктивність вентиляції на 48%.

Висновки та перспективи подальшого розвитку у даному напрямку.

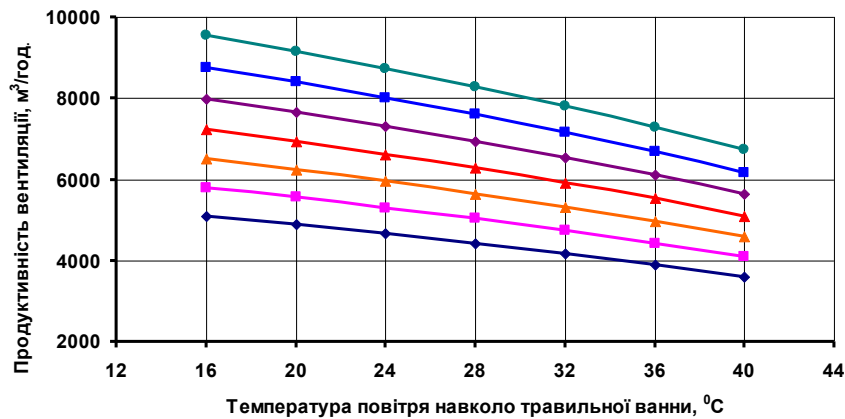
1. Травильні відділення металургійних підприємств поступово переходять від використання сірчаної кислоти на соляну кислоту, тому для відведення шкідливих парів кислот від технологічних ванн доцільно застосовувати двохбортові відсмоктувачі.

2. Аналіз впливу температури виробничого середовища на продуктивність двохбортових відсмоктувачів показав, що допустима температура повітря робочої зони в травильному відділенні для холодної пори року складає 290...296 К та для теплої пори року

291...300 К, при цьому зростання температури повітря навколо ванни з 289 К до 313 К знижує продуктивність вентиляції на 71%.



а



б

Рисунок 3 – Залежність продуктивності вентиляції в травильному відділенні від температури повітря навколо ванни при ширині ванни 0,8 м (а) та 1,4 м (б)

3. Аналіз впливу параметрів травильних ванн на продуктивність вентиляції показав, що збільшення ширини ванни з 0,8 м до 1,4 м підвищує продуктивність вентиляції на 48%. Обрано доцільний діапазон ширини травильної ванни.

4. Серед подальших напрямків роботи потрібно виділити доцільність напрямку реконструкції травильних ванн з урахуванням типу кислоти, що використовують, та умов праці у виробничому середовищі.

Бібліографічний перелік

1. MetalloPraktik.ru. Технология производства металлопроката. Опыт. Исследования. Результаты. Немного об окалине. URL: <http://metallopraktik.ru/novosti/nemnogo-ob-okaline/> (дата звернення: 15.10.2020).
2. Травление окалины и ее механизм. URL: <https://ecm-zink.ru/info/stati/travlenie-okaliny-i-ee-mexanizm.html> (дата звернення: 15.10.2020).
3. Шевченко Л. А., Зелинская В. В., Жупинская Л. Т. Исследование процесса травления горячекатаного полосового проката в турбулентном потоке солянокислотных травильных растворов. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сборник научн. трудов*. Дніпропетровськ: ІЧМ НАН України, 2008. Вип. 17. С. 167-171.

4. Сычков А. Б., Жигарев М. А., Жукова С. Ю. Обеспечение удаления окалины с поверхности катанки перед волочением. *Метизы*. 2007. Вып. 2(15). С. 48-54.
5. Шкірко І. В. Дослідження впливу сірчаної кислоти на процес кристалізації сульфату заліза з відпрацьованого травильного розчину. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2006. № 5. С. 59-62.
6. Кочев А. Г. Вентиляция промышленных зданий и сооружений. Нижний Новгород : Издание ННГАСУ, 2011. 178 с.
7. Шарифуллин В. М. Сравнительный анализ методик расчета бортовых отсосов. *Проблемы науки*. 2018. № 3(26). С. 11-13.
8. Дерябина Е. С., Смирнова В. М., Пачурин Г. В., Горшкова Т. А. Оценка эффективности технических средств защиты воздуха термических цехов. *Фундаментальные исследования*. 2017. № 2. С. 52-56.
9. Филиппов А. А., Пачурин Г. В., Кузьмин Н. А. Оценка опасных и вредных факторов при производстве калиброванного проката и их устранение технологическими методами. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2016. № 7-2. С. 161-164.
10. НПА ОП 28.0-1.03-08. Правила охорони праці у метизному виробництві [Чинний від 2008-12-29]. Київ: Державний комітет з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду, 2008. 82 с.
11. Фактолов Л. И. Основы проектирования литейных цехов и заводов: учебн. для вузов. Москва: Машиностроение, 1979. 376 с.
12. Капустенко П. А., Илюнин О. О., Перевертайленко А. Ю., Самер Лага. Моделирование процесса непрерывного травления листовой углеродистой стали в условиях неопределенности. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2020. № 2. С. 35-44.
13. Ульянов В. А. Расчет бортовых отсосов из технологических ванн травления металлов и сплавов: метод. указания к практическим и лабор. занятиям для студентов. Ч. 3. Нижний Новгород: НГТУ, 2007. 12 с.
14. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень [Чинний від 1999-12-01]. Київ: Міністерство охорони здоров'я України. Головне саніт.-епідем. упр., 1999. 15 с.

References

1. MetalloPraktik.ru. Tehnologija proizvodstva metalloprokata. Opyt. Issledovanija. Rezul'taty. Nemnogo ob okaline. Available at: <http://metallopraktik.ru/novosti/nemnogo-ob-okaline/> (accessed 15.10.2020)
2. Travlenie okaliny i ejo mehanizm. Available at: <https://ecm-zink.ru/info/stati/travlenie-okaliny-i-ee-mexanizm.html> (accessed 15.10.2020).
3. Shevchenko L. A., Zelinskaja V. V., Zhupinskaja L. T. Issledovanie processa travlenija gorjachekatanogo polosovogo prokata v turbulentnom potoke soljanokislotnyh travil'nyh rastvorov. *Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoj metallurgii: sb. nauchn. trudov. Dnipropetrovs'k: IChM NAN Ukraїni*, 2008. vol. 17. pp. 167-171.
4. Sychkov A. B., Zhigarev M. A., Zhukova S. Ju., Perchatkin A. V., Peregudov A. V., Gunkina O. G., Vereshhagina O. N. Obespechenie udalenija okaliny s poverhnosti katanki pered volocheniem. *Metizy*. 2007. vol. 2(15). pp. 48-54.
5. Shkirko I. V. Doslidzhennya vply`vu sirchanoy ky`sloty` na protses kry`stalizatsiyi sul`fatu zaliza z vidpratsz`ovanogo travyl`nogo rozchy`nu. *Visny`k Vinny`tsz`kogo politexnichnogo insty`tutu*. 2006. no. 5. pp. 59-62.
6. Kochev A. G. Ventiljatsija promyshlennyh zdaniy i sooruzhenij. Nizhnij Novgorod: Izdanie NNGASU, 2011. 178 p.
7. Sharifullin V. M. Sravnitel'nyj analiz metodik raschjota bortovih otsosov. *Nauchnyj zhurnal. Problemy nauki*, 2018. no. 3(26). p. 11-13.
8. Derjabina E. S., Smirnova V. M., Pachurin G. V., Gorshkova T. A. Otsenka jeffektivnosti tehnicheskikh sredstv zashhity vozduha termicheskikh cehov. *Fundamental'nye issledovanija*. 2017. no. 2. pp. 52-56.

9. Filippov A. A., Pachurin G. V., Kuz'min N. A. Otsenka opasnyh i vrednyh faktorov pri proizvodstve kalibrovannogo prokata i ih ustranenie tehnologicheskimi metodami. *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij*. 2016. no. 7-2. pp. 161-164.
10. NPAOP 28.0-1.03-08. *Pravyla okhorony pratsi u metyznomu vyrobnytstvi* [Chynnyy vid 2008-12-29]. Kyiv: Derzhavnyy komitet z promyslovyi bezpeky, okhorony pratsi ta hirnychoho nahlyadu, 2008. 82 p.
11. Fantalov L.I., Knorre B.V., Chetveruhin S.I. Osnovy proektirovaniya litejnyh tsehov i zavodov: uchebn. dlja vuzov po special'nostjam «Mashiny i tehnologija litejnogo proizvodstva» i «Litejnoe proizvodstvo chernyh i tsvetnyh metallov»; pod red. B. V. Knorre. 2-e izd., pererab. Moskva: Mashinostroenie, 1979. 376 p.
12. Kapustenko P. A., Iljunin O. O., Perevertajlenko A. Ju., Samer Laga. Modelirovanie processa napreryvnogo travlenija listovoj uglerodistoj stali v uslovijah neopredeljonnosti. *Integrovani tehnologii ta energozberezhenja*. 2020. no. 2. pp. 35-44.
13. Ul'janov V. A., Gushhin V. N., Balan S. A., Jarovaja E. I. Raschet bortovyh otsosov iz tehnologicheskikh vann travlenija metallov i splavov: metod. ukazaniya k prakticheskim i lab. zanjatijam dlja studentov spec. 1103, 1105, 1203, 1208 vseh form obrazovanija. Ch.3. Nizhnij Novgorod: NGTU, 2007. 12 p.
14. DSN 3.3.6.042-99. *Sanitarni normy mikroklimatu vyrobnychych prymishchen'* [Chynnyy vid 1999-12-01]. Kyiv: Ministerstvo okhorony zdorov'ya Ukrainy. Holovne san.-epidem. upr., 1999. 15 p.

Tarasov Vyacheslav, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporizhzhia national university.

Vodennikova Oksana, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporizhzhia national university.

Vodennikov Sergii, Professor, doctor of technical sciences, Zaporizhzhia polytechnic national university.

Lysenko Yehor, student, Zaporizhzhia national university.

Makushyna Mylana, student, International Humanitarian university, c. Odessa.

INVESTIGATION OF EFFICIENCY OF ON-BOARD SUCTION VACUUM CLEANERS' USE

Modern technical means of environment protection from dangerous and harmful effects in pickling workshops of metallurgical enterprises are analyzed. It is defined that in metal etching the efficiency of scale removal depends on its chemical composition, structure, thickness and etching conditions, in particular the choice of acid type (sulfuric or hydrochloric) and etching technology. The use of single- or double-sided extractors is proposed in order to prevent harmful substances from getting the air into the working area of the pickling tank. It is analyzed that the amount of air removed by single- and double-sided extractors is determined depending on the width and height of the pickling bath; the level of liquid (sulfuric or hydrochloric acids) in the bath; indoor air mobility and the temperature difference between the solution and the ambient air. The use of double-sided suction pumps is proposed for the removal of aerosols formed from technological baths for the conditions of the pickling workshops of JISC «Zaporizhstal», which switched of scale from sulfuric to hydrochloric acid during the etching. The influence of the parameters of pickling baths (width and length) and the temperature of the production environment on the productivity of double-sided suction pumps is analyzed. It is defined that the allowable air temperature of the working area in the pickling department for the cold and warm seasons is 290...296 K and 291...300 K, respectively, while the increase in air temperature around the bath from 289 K to 313 K directly proportionally reduces productivity ventilation by 71%. Increasing the width of the pickling bath by 0.6 m increases the ventilation productivity by 48%, so the range from 0.9 m to 1.2 m is chosen for the appropriate range of tank width. It is necessary to allocate expediency of the direction of reconstruction of pickling baths taking into account the type of acid which will be used, and working conditions in the production environment among the further directions of research.

Стаття надійшла: 08.11.2020 р.

УДК 628.83:697.911]:613.63

DOI <https://doi.org/10.26661/2071-3789-2020-1-18>

Рижков Вадим Генієвич, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет. ORCID: 0000-0002-0768-544X

Бєлоконь Карина Володимирівна, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет. ORCID: 0000-0003-2000-4052

Манідіна Євгенія Анатоліївна, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет. ORCID: 0000-0003-4090-9991

Троїцька Олена Олександрівна, доцент, кандидат біологічних наук, Запорізький національний університет., ORCID 0000-0003-0214-5476

Радченко Юрій Миколайович, доцент, кандидат технічних наук, Національна металургійна академія України. ORCID: 0000-0002-5055-6707

ДО РОЗРАХУНКУ ВЕНТИЛЯЦІЇ ВИРОБНИЧИХ ПРИМІЩЕНЬ ЗА УМОВ ВИДІЛЕННЯ ДЕКІЛЬКОХ ШКІДЛИВИХ РЕЧОВИН

Визначено необхідну продуктивність вентиляційної установки для зменшення концентрації шкідливих речовин за умов одночасного виділення до повітря робочої зони декількох речовин. Розглянуто варіанти речовини різноспрямованої дії; речовини односпрямованої дії з адитивним ефектом; речовини односпрямованої дії з підсилюючим (потенційованим) ефектом; речовини односпрямованої дії з послаблюючим (антагоністичним) ефектом. Запропоновано рівняння, що описують продуктивність вентиляційної установки для зазначених варіантів надходження шкідливих речовин до повітря.

Ключові слова: вентиляція, концентрація, продуктивність, рівняння, шкідлива речовина

Вступ. Шкідливі речовини у повітрі робочої зони виробничих приміщень є одним з головних чинників, що погіршують санітарно-гігієнічний стан на робочому місці. Особливо це стосується металургійних цехів та інших приміщень підприємств чорної та кольорової металургії. Виділення шкідливих газів парів та пилу до повітря робочої зони виробничих приміщень, погіршують умови праці, підвищують рівень їх концентрацій до значень, які перевищують граничнодопустимі концентрації (ГДК) та негативно впливають на здоров'я робітників. Наприклад, у конверторних цехах концентрація фіброгенного пилу може перевищувати ГДК у шість разів [1], а у мартенівських цехах – у п'ятдесят чотири рази [2]. Концентрація оксидів азоту на розливному майданчику мартенівського цеху перевищує ГДК майже у вісім разів [2].

Одним з найбільш ефективних засобів боротьби з підвищеною концентрацією шкідливих речовин у повітрі робочої зони є виробнича загальна та місцева вентиляції. Вимоги до систем загальної вентиляції встановлюють ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування» [3], ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны (ССБП. Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони) [4], ДСТУ Б EN 13779:2011 «Вентиляція громадських будівель» [5], ДСН 3.3.6.042-99 «Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» [6] тощо.

Аналіз досягнень. Для описування процесу повітрообміну під час видалення шкідливих речовин з повітря виробничих приміщень можна використовувати головне диференціальне рівняння вентиляції [7]:

$$Mdt + Q \cdot c_0 dt - Q \cdot c dt = Vdc \quad , \quad (1)$$

де M – швидкість виділення шкідливих речовин до об'єму приміщення, кг/с або кг/год.; Q – витрати вентиляційного повітря (продуктивність вентиляційної установки), м³/с або м³/год.; V – внутрішній об'єм приміщення, м³; c – поточне значення концентрації

шкідливих речовин у повітрі приміщення (середнє за об'ємом), $\text{кг}/\text{м}^3$; c_0 – концентрація шкідливих речовин у зовнішньому повітрі, $\text{кг}/\text{м}^3$; t – час, с, або год.

Аналізуючи рівняння (1) треба мати на увазі, що за роботи будь якої системи вентиляції (припливної, витяжної, припливно-витяжної) кількість видаленого повітря дорівнює його кількості, що привнесено зовні, тому що приміщення не є герметичним і в ньому постійно відбувається повітрообмін.

Розглядаємо процес, що відбувається у приміщенні за подаванням і видаленням повітря у кількості Q за елементарний відрізок часу dt . За цей час концентрація шкідливої речовини у приміщенні зміниться на dc .

У лівій частині рівняння (1) надано кількість шкідливої речовини, що виділяються від внутрішніх джерел (перший член), які потрапляють із зовнішнім повітрям (другий член) і видаляються з приміщення (третій член), у його правій частині – наведено приріст кількості шкідливої речовини у приміщенні за час dt .

Рівняння (1) має загальне вирішення:

$$c = \exp\left(-\int \frac{Qdt}{V}\right) \cdot \left[\int \left(\frac{M + Q \cdot c_0}{V}\right) \cdot \exp\left(\int \frac{Qdt}{V}\right) dt + C \right], \quad (2)$$

де C – стала інтегрування.

У роботі [8] наведено розв'язання рівняння (1) за умов $M = \text{const}$, $Q = \text{const}$, $c_0 = \text{const}$ та за початкових умов $t=0$, $c = c_n$:

$$c = c_0 + \frac{M}{Q} + \left[c_n - c_0 - \frac{M}{Q} \right] \cdot \exp\left(-\frac{Q \cdot t}{V}\right), \quad (3)$$

де C_n – початкова концентрація шкідливої речовини

У роботі [9] виконано розкладання експоненти у другому доданку рівняння (3) в ряд Тейлора за ступенями $\exp(-Q \cdot t / V)$. Згідно формулам для обернення ступеневого ряду отримано рівняння для визначення продуктивності вентиляційної установки, що забезпечує зниження концентрації шкідливої речовини до прийняттого значення за наданий проміжок часу для умов постійної швидкості виділення цієї шкідливої речовини, яке має вигляд:

$$Q = \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cdot \left(c_n - c_0 + \frac{M \cdot t}{V} \right)^i, \quad (4)$$

$$\text{де } a_1 = \frac{2V^2}{2V \cdot (c_n - c_0) \cdot t + M \cdot t^2}; \quad a_2 = \frac{4 \left[3V \cdot (c_n - c_0) \cdot t^2 + M \cdot t^3 \right] \cdot V^3}{3 \left[2V \cdot (c_n - c_0) \cdot t + M \cdot t^2 \right]^3};$$

$$a_3 = \frac{4V^4 \cdot \left[4V^2 \cdot (c_n - c_0)^2 + 2V \cdot (c_n - c_0) \cdot M \cdot t + 0,33M^2 \cdot t^2 \right]}{3t \cdot \left[2V \cdot (c_n - c_0) + M \cdot t \right]^5}.$$

$$a_4 = \frac{1}{\left[\frac{(c_n - c_0) \cdot t}{V} + \frac{M \cdot t^2}{2V^2} \right]^7} \cdot \left\langle 5 \left[\frac{(c_n - c_0) \cdot t}{V} + \frac{M \cdot t^2}{2V^2} \right] \cdot \left[\frac{(c_n - c_0) \cdot t^2}{2V^2} + \frac{M \cdot t^3}{6V^3} \right] \right\rangle.$$

$$\cdot \left[\frac{(c_n - c_0) \cdot t^3}{6V^3} + \frac{M \cdot t^4}{24V^4} \right] - \left[\frac{(c_n - c_0) \cdot t}{V} + \frac{M \cdot t^2}{2V^2} \right]^2 \cdot \left[\frac{(c_n - c_0) \cdot t^4}{24V^4} + \frac{M \cdot t^5}{120V^5} \right] -$$

$$-5 \left[\frac{(c_n - c_0) \cdot t^2}{2V^2} + \frac{M \cdot t^3}{6V^3} \right]^3 \Bigg\rangle, c_k - \text{кінцева концентрація шкідливої речовини, яку не}$$

обхідно забезпечити за роботи системи вентиляції.

Подальше розкладання рівняння (4) у ряд Тейлора свідчить про складність і громіздкість його наступних членів. Для практичних розрахунків достатньо обмежитися його трьома...чотирма першими членами.

У разі виділення однієї шкідливої речовини до повітря робочої зони виробничого приміщення має виконуватися нерівність:

$$c_k \leq g, \quad (5)$$

де g – гранично допустима концентрація (ГДК) шкідливої речовини у повітрі робочої зони.

У такому разі мінімально потрібну продуктивність вентиляції обчислюють за формулою:

$$Q = \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cdot \left(c_n - g + \frac{M \cdot t}{V} \right)^i. \quad (6)$$

Постановка завдання. На практиці до повітря виробничого приміщення часто прямує декілька шкідливих речовин. Тому завданням роботи є отримання відповідних залежностей для продуктивності вентиляційної установки за умов виділення декількох речовин різноспрямованої дії; односпрямованої дії з адитивним ефектом; односпрямованої дії з підсилюючим (потенційованим) ефектом; односпрямованої дії з послаблюючим (антагоністичним) ефектом.

Головна частина досліджень. Речовинами різноспрямованої дії є загально токсичні речовини (пари ртуті), хімічно задушливі речовини (оксид вуглецю) та речовини фіброгенної дії (пил двооксиду кремнію). У такому разі потрібно розглядати кожен речовину окремо та обчислювати для неї витрату вентиляційного повітря за формулою (5). Після цього з декількох отриманих значень витрат для реалізації обирають максимальну величину: $Q = (Q_i)_{\max}$.

Характер дії на організм робітника речовин односпрямованої дії з адитивним ефектом є однаковим. Тому наслідки впливу декількох речовин з адитивним ефектом підсумовуються. До таких речовин слід віднести насичені вуглеводні – метан, етан, пропан, бутан тощо, або галогени – хлор, фтор, йод, бром.

Якщо до повітря виробничого приміщення виділяються дві речовини односпрямованої дії з адитивним ефектом, то повинна виконуватися нерівність:

$$\frac{c_1}{g_1} + \frac{c_2}{g_2} \leq 1, \quad (7)$$

де c_1, c_2 – концентрації першої та другої речовини відповідно; g_1, g_2 – їх ГДК.

Якщо занесення шкідливих речовин зовні є відсутнім, то їх концентрація у повітрі c буде прямо пропорційною швидкості їх виділення M :

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{M_1}{M_2}. \quad (8)$$

Для визначення максимально допустимих кінцевих значень концентрацій обох речовин $c_{1к}$ і $c_{2к}$ знак нерівності у формулі (6) замінюють на знак рівності та додають формулу (7). Записують систему рівнянь:

$$\frac{c_1}{g_1} + \frac{c_2}{g_2} = 1 \quad (9)$$

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{M_1}{M_2} \quad (10)$$

розв'язання якої відносно концентрацій $c_{1к}$ і $c_{2к}$ має вигляд:

$$c_{1к} = \frac{M_1 \cdot g_1 \cdot g_2}{M_1 \cdot g_2 + M_2 \cdot g_1}; \quad (11)$$

$$c_{2к} = \frac{M_2 \cdot g_1 \cdot g_2}{M_1 \cdot g_2 + M_2 \cdot g_1}. \quad (12)$$

Використовуючи отримані значення $c_{1к}$ і $c_{2к}$ можна обчислити мінімально потрібну продуктивність вентиляційної установки шляхом перетворення формули (4), яку для обох речовин можна записати як:

$$Q_1 = \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cdot \left(c_{1n} - \frac{M_1 \cdot g_1 \cdot g_2}{M_1 \cdot g_2 + M_2 \cdot g_1} + \frac{M_1 \cdot t}{V} \right)^i; \quad (13)$$

$$Q_2 = \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cdot \left(c_{2n} - \frac{M_2 \cdot g_1 \cdot g_2}{M_1 \cdot g_2 + M_2 \cdot g_1} + \frac{M_2 \cdot t}{V} \right)^i, \quad (14)$$

де c_{1n} , c_{2n} – відповідно початкова концентрація першої та другої шкідливої речовини.

З двох отриманих значень Q_i обирають більшу величину.

Розглянемо випадок, коли у повітрі виробничого приміщення знаходиться n речовин односпрямованої дії з адитивним ефектом і швидкістю виділення до повітря i -ої речовини M_i , ГДК якої дорівнює g_i . Тоді маємо:

$$\sum_{i=1}^n \frac{c_i}{g_i} \leq 1. \quad (15)$$

Використовуючи вище наведений алгоритм для двох шкідливих речовин, отримують залежності для максимально допустимих кінцевих концентрацій речовин:

$$c_{ік} = \frac{M_1 \cdot \prod_{j=1}^n g_j}{\sum_{k=1}^n M_k \cdot \prod_{j \neq k}^n g_j}. \quad (16)$$

Отриману залежність застосовують у формулах для розрахунків витрати вентиляційного повітря:

$$Q_i = \sum_{p=1}^{\infty} a_p \cdot \left(c_{in} - \frac{M_1 \cdot \prod_{j=1}^n g_j}{\sum_{k=1}^n M_k \cdot \prod_{j \neq k}^n g_j} + \frac{M_i \cdot t}{V} \right)^p, \quad (17)$$

де c_{in} – початкова концентрація i -ої шкідливої речовини у повітрі; коефіцієнти a_p відповідають коефіцієнтам a_i у формулі (4).

З усіх визначених значень витрат вентиляційного повітря для реалізації також обирають максимальне значення $Q = (Q_i)_{\max}$.

У разі односпрямованої дії речовин з підсилюючим (потенційованим) ефектом на організм робітників її характер є однаковим, але слід зазначити, що наслідки впливу декількох речовин з підсилюючим ефектом більш тяжкі, ніж сума ефектів окремих речовин. Так, мідь підсилює отруйну дію нікелю у десять разів, етанол підвищує тяжкість отруєння аніліном. Також потенційований ефект спостерігають за одночасної дії сірководню та вуглеводнів. Таке явище ще називають синергізмом [10]. Для синергізму має виконуватися нерівність:

$$\sum_{i=1}^n \frac{c_i}{g_i} \leq K < 1, \quad (18)$$

де K – константа, що залежить від виду шкідливої речовини.

Для речовин з підсилюючим ефектом отримано таку залежність:

$$Q_i = \sum_{p=1}^{\infty} a_p \cdot \left(c_{in} - K \cdot \frac{M_1 \cdot \prod_{j=1}^n g_j}{\sum_{k=1}^n M_k \cdot \prod_{j=1, j \neq k}^n g_j} + \frac{M_i \cdot t}{V} \right)^p. \quad (19)$$

Під час односпрямованої дії двох шкідливих речовин з послаблюючим (антагоністичним) ефектом одночасно одна речовина послаблює дію іншої. Прикладом може бути взаємодія між інсектицидом езерину та атропіном (атропін є протиотрутою, антидотом). Токсичність аміаку послаблюється дією двооксиду вуглецю. Антагоністичний ефект спостерігають за одночасної дії хлору та двооксиду сірки [10].

Логічно було би у цьому разі використовувати формулу (18) за умови $K > 1$. Проте, фахівці з безпеки життєдіяльності та охорони праці [11,12] вважають, що доцільніше застосовувати залежність (15). Тому під час обчислень витрат вентиляційного повітря за умови виділення шкідливих речовин з антагоністичним ефектом слід використовувати формулу (17).

Висновки. Отримано залежності для розрахунку мінімально потрібної продуктивності вентиляційної установки, що забезпечує зниження концентрації шкідливих речовин до прийняттого рівня за наданий проміжок часу за умов виділення до повітря робочої зони з постійною швидкістю речовин різноспрямованої дії; речовин односпрямованої дії з адитивним ефектом, речовин односпрямованої дії з підсилюючим (потенційованим) ефектом, також речовин односпрямованої дії з послаблюючим (антагоністичним) ефектом.

Бібліографічний перелік

1. Гасило Ю. А., Крюковська О. А. Дослідження умов праці працівників конверторних цехів. URL: http://www.rusnauka.com/36_NIO_2008/Tecnic/39311doc.htm.
2. Охрана труда. Информационный ресурс. URL: http://ohrana-bgd.ru/metal/metal1_11.html.
3. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування [Чинний від 01.01.2014] / Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2013. 141 с.
4. ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны (ССБП. Загальні санитарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони) [Чинний від 01.01.1989] / Київ : Міністерство охорони здоров'я, 2000. 95 с.
5. ДСТУ Б EN 13779:2011 Вентиляція громадських будівель. Вимоги до виконання систем вентиляції та кондиціонування повітря (EN 13779:2007, IDT) [Чинний від 01.01.2013].
6. ДСН 3.3.6.042-99 Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень [Чинний від 01.12.1999] Київ : Міністерство охорони здоров'я України, 2000. 10 с.
7. Дроздов В. Ф. Отопление и вентиляция. В двух частях. Москва : Высшая школа, 1984. Ч. 2. Вентиляция. 263 с.
8. Рыжков В. Г. К расчету вентиляции производственных помещений металлургических предприятий. Металлургия : Научные труды ЗГИА. 2002. Вып. 6. С.172-176.
9. Рижков В. Г., Белоконь К. В., Манідіна Є. А., Троїцька О. О. До розрахунку вентиляції виробничих приміщень з урахуванням змінювання виділення шкідливих речовин Металургія : Наукові праці ЗДІА. 2019. Вип. 1 (41). С. 119 -122.
10. Информационный сайт по безопасности жизнедеятельности. URL : <http://www.kornienko-ev.ru/BCYD/page232/page384/index.html>.
11. Гелашвили Д. Б., Безель В. С., Безруков М. Е. Принципы и методы экологической токсикологии / . Нижний Новгород : Издательство Нижегородского книверситета, 2015. 745 с.

12. Радоуцкий В. Ю., Партигул Е. О., Янишин В. В. Производственная санитария и охрана труда : учебно-методический комплекс. Белгород : БГТУ, 2005. 287 с.

References

1. Gasylo Yu. A., Kryukovska O. A. Doslidzhennya umov pratsi pratsivnykiv konvertornykh tsekhiv. URL: http://www.rusnauka.com/36_NIO_2008/Tecnic/39311 doc.htm.
2. Okhrana truda. Informacziornyj resurs. URL: http://ohrana-bgd.ru/metal/metal1_11.html.
3. DBN V.2.5-67:2013. Opalennya, ventilyatsiya ta kondytsiyuvannya [Chynnyi vid 01.01.2014] / Kyiv : Ministerstvo regionalnogo rozvytku, budivnytszta ta zhytlovo-komunalnogo gospodarstva Ukrainy, 2013. 141 p.
4. GOST 12.1.005-88 SSBT. Obshchie sanitarno-gigienicheskie trebovaniya k vozdukhу rabochej zony (SSBP. Zagal'ni sanitarno-gigiyenichni vymogy do povitrya robochoyi zony) [Chynnyi vid 01.01.1989] : Kyiv : Ministerstvo oxorony zdorovya, 2000. 95 p.
5. DSTU B EN 13779:2011 Ventilyatsiya gromadskykh budivel. Vymogy do vykonannya system ventilyatsiyi ta kondytsionuvannya povitrya (EN 13779:2007, IDT) [Chynnyi vid 01.01.2013].
6. DBN 3.3.6.042-99 Derzhavni sanitarni normy mikroklimatu vyrobnychykh prymishchen [Chynnyi vid 01.12.1999] Kyiv : Ministerstvo oxorony zdorovya Ukrainy, 2000. 10 p.
7. Drozdov V. F. Otoplenie i ventilyatsiya. V dvukh chastyakh. Moskva : Vysshaya shkola, 1984. Ch. 2. Ventilyatsiya. 263 p.
8. Ryzhkov V. G. K raschyotu ventilyatszii proizvodstvennykh pomeshhenij metallurgicheskikh predpriyatii. *Metallurgiya : Nauchnye trudy Zaporozhskoj gosudarstvennoj inzhenernoj akademii*. Zaporozh'e : 2002. vol. 6. pp. 172-176.
9. Ryzhkov V. G., Byelokon K. V., Manidina Ye. A., Troyitszka O. O. Do rozrakhunku ventilyatsiyi vyrobnychykh prymishchen z urakhuvannyam zminyuvannya vydilennya shkidlyvykh rehovyn *Metallurgiya : Naukovi pratsi ZDIA*. 2019. vol. 1 (41). pp. 119-122.
10. Informacziornyj sajt po bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti. URL : <http://www.kornienko-ev.ru/BCYD/page232/page384/index.html>.
11. Gelashvili D. B., Bezel' V. S., Bezrukov M. E. Printsypy i metody ekologicheskoy toksikologii / Nizhnij Novgorod : Izdatel'stvo Nizhegorodskogo universiteta, 2015. 745 p.
12. Radoutszkij V. Yu., Partigul E. O., Yanishin V. V. Proizvodstvennaya sanitariya i okhrana truda : uchebno-metodicheskij kompleks. Belgorod : BGTU, 2005. 287 p.

Ryzhkov Vadim, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporozhe national university.

Belokon' Karina, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporozhe national university.

Manidina Eugenia, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporozhe national university.

Troits'ka Helen, associate professor, candidate of biological sciences, Zaporozhe national university.

Radchenko Yurii, associate professor, candidate of technical sciences, National metallurgical academy of Ukraine, с. Dnepr.

TO CALCULATION OF VENTILATION FOR SHOPFLOORS AT CONDITIONS OF SEGREGATION OF A FEW NOXIOUS MATTERS

This article discusses the problem of finding the minimum necessary air exchange to remove several harmful substances from the volume of the working room with a different nature of action. The authors determined the required performance of the ventilation unit to reduce the concentration of harmful substances to acceptable values for a given period of time. The conditions for the simultaneous release of several harmful substances into the air of the working zone were considered. As a basis for analysis, the well-known main differential equation of air exchange (ventilation) was adopted. After appropriate mathematical transformations, the authors obtained equations describing the performance of the ventilation unit for four options for the entry of harmful substances into the air. The first option involves the release of substances of multidirectional action (that is, each substance has an effect on the body of a certain nature, independent of the effects of other substances). For example, it can be a substance with a general

toxic effect, such as mercury, chemically asphyxiating, like carbon monoxide and a substance with fibrogenic action, like silicon dioxide. The second option is the allocation of unidirectional substances with the effect of summation (additive effect). Moreover, the effects of exposure to substances are summarized. Such properties are, for example, hydrocarbons: methane, ethane, propane, etc. The third option is the release of unidirectional substances with an enhancing effect, when one substance enhances the toxic effect of another (like ethanol and aniline). The fourth option is the release of unidirectional substances with a weakening effect, when one substance weakens the toxic effect of another (like chlorine and sulfur dioxide). For each option, dependencies are proposed that allow you to determine the minimum required flow rate of ventilation air.

Стаття надійшла: 19.06.2020 р.

Наукове видання

МЕТАЛУРГІЯ

2020

Випуск 1

Технічне редагування – **В.І. Іванов**
Комп'ютерна верстка та макетування – **В.М. Очинський**

Підп. до друку 26.11.2020. Формат 60x84/8.
Формат 60x84/8. Гарнітура Times New Roman.
Папір офсет. Цифровий друк. Ум.-друк. арк. 36,51.
Замов. № 0221/42. Наклад 100 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»
69063, Україна, м. Запоріжжя, вул. Олександрівська, 84, оф. 414
Телефони: +38 (048) 709 38 69, +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08
E-mail: mailbox@helvetica.com.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 6424 від 04.10.2018 р.