

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
АКАДЕМІЯ ІНЖЕНЕРНИХ НАУК УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА МЕТАЛУРГІЇ

№3
(140)
2023

ЗАГАЛЬНОДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ

Видається з березня 1997 року
Виходить 6 разів на рік

Засновники: Національна металургійна академія України
Відділення матеріалознавства та металургії
Академії інженерних наук України

Видавці: Національна металургійна академія України
Відділення матеріалознавства та металургії
Академії інженерних наук України

Дніпро
2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ
АКАДЕМІЯ ІНЖЕНЕРНИХ НАУК УКРАЇНИ

Загальнодержавний
науково-технічний журнал

ISSN 1028-2335

Випуск 3 (140) 2023р

Свідоцтво про реєстрацію:
серія КВ № 21962-11862ПР
від 23 березня 2016 року

Наказом МІНІСТЕРСТВА ОСВІТИ І
НАУКИ УКРАЇНИ №157 від
09.02.2021 р. журнал включено до
категорії «Б» переліку наукових
фахових видань України, по
спеціальностям:

133 – Галузеве машинобудування;
136 – Металургія;
161 – Хімічні технології

Формат 60x84¹/₈.
Ум.друк.арк. 5,12

Адреса редакції та видавця: Національна
металургійна академія України,
пр.Гагаріна, 4, м.Дніпро, 49006
т.(056) 745-41-96;
Тираж 100 прим.

Засновники:

Центр (відділення) матеріалознавства і металургії Академії
інженерних наук України

Національна металургійна академія України

Редакційна колегія

Головний редактор

д.т.н., проф. **Пройдак Ю.С.** (Україна)

Заступник головного редактора

д.т.н., проф. **Камкіна Л.В.** (Україна)

д.т.н., проф. Білодіденко С.В.	(Україна)
д.т.н., проф. Волкова О. І.	(Німеччина)
д.т.н., проф. Гнатушенко В.В.	(Україна)
д.т.н., проф. Кнапинський М.Я.	(Польща)
д.т.н., проф. Куцова В.З.	(Україна)
д.т.н., проф. Лежнев С.М.	(Казахстан)
д.т.н., проф. Лялюк В.П.	(Україна)
д.т.н., проф. Малий Є.І.	(Україна)
д.т.н., проф. Медовар Л.Б.	(Україна)
д.т.н., проф. Сігарьов Є.М.	(Україна)
д.т.н., проф. Стовпченко Г.П.	(Україна)
д.т.н., проф. Фролов Я.В.	(Україна)
д.т.н., проф. Шатоха В.І.	(Україна)

Передрук лише за дозволом редакції

При використанні матеріалів посилання на журнал обов'язкове
**Видавництво не несе відповідальність за зміст матеріалу,
наданого автором до друку**

Матеріали публікуються на мові оригіналу

За якість перекладу статей на англійську мову редакція відповідальності не несе
**Редакційна рада залишає за собою право змінювати текст статей,
не впливаючи на загальний зміст наданого матеріалу**



+38056-745-41-96;

<http://tpm.nmetau.edu.ua>

e-mail: projdak@metal.nmetau.edu.ua

Комп'ютерне верстання О.Г.Безшкуренко

©УДУНТ 2023

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
ACADEMY OF ENGINEERING SCIENCES OF UKRAINE
NATIONAL METALLURGICAL ACADEMY OF UKRAINE

THEORY AND PRACTICE OF METALLURGY

#3
(140)
2023

GENERAL STATE SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Issued since March 1997
Released 6 times a year

Founders: National Metallurgical Academy of Ukraine
Department of Materials Science and Metallurgy
Of the Academy of Engineering Sciences of Ukraine

Publishers: National Metallurgical Academy of Ukraine
Department of Materials Science and Metallurgy
Of the Academy of Engineering Sciences of Ukraine

Dnipro
2023

**MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
ACADEMY OF ENGINEERING SCIENCES OF UKRAINE
NATIONAL METALLURGICAL ACADEMY OF UKRAINE**

National scientific journal

ISSN 1028-2335

Edition 3 (140) 2023 year

Certificate of registration:

KB № 21962-11862ПП

23.03.2016

By the order of the MINISTRY OF
EDUCATION AND SCIENCE OF
UKRAINE №157 from 09.02.2021,
the journal is included in category "B"
of the list of scientific professional
publications of Ukraine, by
specialties:

133 - Industry engineering;

136 - Metallurgy;

161 - Chemical technologies

Format 60x84¹/₈.

CPP. 5,12

Editorial address and publisher: National
Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarina,
4, Dnipro 49006

т.(056) 745-41-96;

Copies of 100.

Founders:

Center (Department) of Materials Science and Metallurgy of the
Academy of Engineering Sciences of Ukraine
National Metallurgical Academy of Ukraine

Editorial board

Editor in Chief

D.Tech.Sc., prof. **Proydak Yu** (Ukraine)

Honorable Editor

D.Tech.Sc., prof. **Kamkina L.** (Ukraine)

Prof., d.t.s. Bilodidenko S.	(Ukraine)
Prof., d.t.s. Volkova O.	(Germany)
Prof., d.t.s. Gnatushenko V.	(Ukraine)
Prof., d.t.s. Knapinskij M.	(Poland)
Prof., d.t.s. Kutsova V.	(Ukraine)
Prof., d.t.s. Lezhnyev S.	(Kazakhstan)
Prof., d.t.s. Lyalyuk V.	(Ukraine)
Prof., d.t.s. Malij Ye.	(Ukraine)
Prof., d.t.s. Medovar L.	(Ukraine)
Prof., d.t.s. Sigarov Ye	(Ukraine)
Prof., d.t.s. Frolov Ya.	(Ukraine)
Prof., d.t.s. Shatoha V.	(Ukraine)

Reproduction only with permission of the publisher

With reference to the journal is obligatory

Publisher is not responsible for the content of the material,
by authors for publication

Publikuyutsya materials in the original language

For quality translations of articles on English version is not liable

Editorial Board reserves the right to change the text of the articles without affecting
the overall content of the material



+38056-745-41-96;

<http://tpm.nmetau.edu.ua>

e-mail: projdak@metal.nmetau.edu.ua

Computer layout by Olexej Bezshkurenko

©USUST 2023

УДК 622.83+539.4

Маліч М.Г., Катан В.О., Різо З.М., Кресс Д.В., Авраменко С.О.

Аналіз руйнування призматичних усічено-конусних зразків гірської породи при симетричному та асиметричному навантаженні

Malich M.G., Katan V.O., Rizo Z.M., Kress D.V., Avramenko S.O.

Analysis of destruction of prismatic truncated-conical rock specimens under symmetrical and asymmetric loading

Мета. Аналіз руйнування призматичних усічено-конусних зразків гірської породи на підставі математичного моделювання з використанням встановлених закономірностей напружень та деформацій у гірській породі при симетричному та асиметричному навантаженні.

Методика. Використано комплексний метод узагальнення закономірностей теорії пружності та пластичності, закономірності розподілу контактних нормальних та дотичних напружень, рівняння граничного стану матеріалів, заснованих на критерії міцності Кулону; теорії ліній ковзання; зіставлення теоретичних результатів з експериментальними діаграмами «нормальне напруження-подовжня деформація» зразків; факти та явища руйнування гірських порід; узагальнення теоретичних закономірностей, що виникають при силовому навантаженні породи в дробарках.

Практична значущість. Створення асиметричних умов навантаження з використанням сил контактної тертя з врахуванням фрикційних та міцнісних характеристик матеріалу, що руйнується, дозволять планувати та знижувати енергоспоживання при дезінтеграції у дробарках.

Ключові слова: гірські породи, усічено-конусні зразки, теорії руйнування, контактне тертя, дотичні напруження, асиметрія, дробарки.

Goal. Analysis of the destruction of prismatic truncated-conical rock samples based on mathematical modeling using the established patterns of stresses and deformations in the rock under symmetrical and asymmetrical loading.

Method. A complex method of generalization of the laws of the theory of elasticity and plasticity, the laws of the distribution of contact normal and tangential stresses, the equation of the limit state of materials based on the Coulomb strength criterion was used; theories of slip lines; comparison of theoretical results with experimental "normal stress-longitudinal strain" diagrams of samples; facts and phenomena of rock destruction; generalization of theoretical regularities that arise during force loading of rock in crushers.

Practical significance. Creating asymmetric load conditions using contact friction forces, taking into account the frictional and strength characteristics of the material being destroyed, will allow planning and reducing energy consumption during disintegration in crushers.

Key words: rocks, truncated cone samples, theories of destruction, contact friction, tangential stresses, asymmetry, crushers.

Вступ. Для оцінки технологічних та конструктивних параметрів машин для дезінтеграції гірських порід та в процесах дроблення треба мати характеристики міцності шматків гірської породи [1,2]. Для цього використовують довідники з даними про фізико-механічні характеристики матеріалів або проводять експериментальні дослідження на міцність стандартних зразків правильної форми [3,4,5]. Така інформація присутня і в англійській сучасній технічній літературі [6,7], де неодноразово були проаналізовані форми руйнування стандартних зразків гірських порід. Але ці дані не є типовим у реальних умовах дезінтеграції твердих корисних копалин, тому важливо змодельовувати вплив різних форм зразків гірської породи на їх міцність. В статті ставиться задача оцінити вплив кута відхилення бічної поверхні призматичного усічено-конусного зразка від нормалі до контактної площини на їх міцність при симетричному та асиметричному навантаженні.

Основна частина. В технічній літературі з обробки металів тиском така задача існує.

Скористаємося відомою методикою [8] обліку кута γ – кута між нормаллю до основи зразка та його бічної поверхні, викладеної в літературі для усічено-конусного зразка. На рис.1 наведені схеми траєкторій максимальних ефективних дотичних напружень (ТМЕДН ξ) для усічено-конусних зразків при симетричному навантаженні.

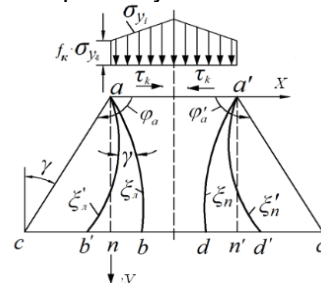


Рисунок 1 - Схеми ТМЕДН (ξ_n и ξ'_n) для усічено-конусних зразків при симетричному навантаженні
Також розглянемо інші відхилення бічної поверхні зразка від нормалі з однією (рис.2,а) та з двох сторін (рис.2,б).

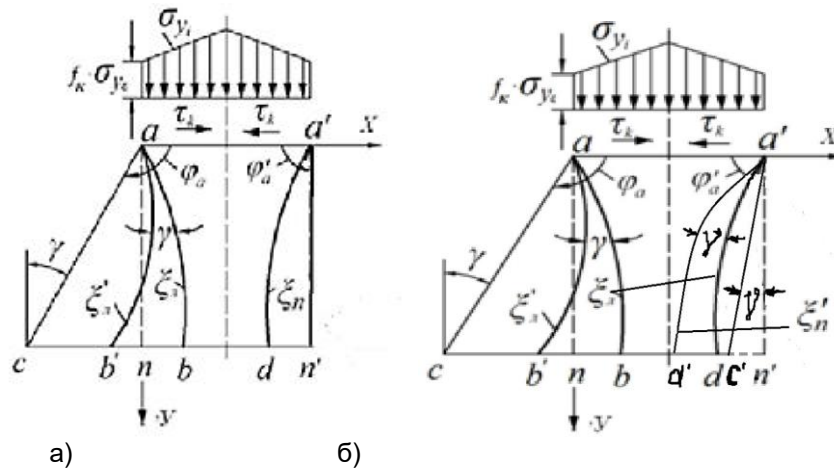


Рисунок 2 – Схеми ТМЕДН (ξ'_n и ξ'_n) для усічено-конусних зразків з різними відхиленнями початкової форми при симетричному навантаженні

Для точного розрахунку слід використовувати метод розрахунку параметрів діаграм для циліндричного зразка, скоригованими з урахуванням його конусності.

Однак рішення настільки ускладнюється, що важко зберегти фізичний зміст складових згаданих виразів, враховуючи при цьому невелику різницю рівня достовірності призматичних та циліндричних зразків. Тому проведемо приблизний розрахунок для усічено-конусного призматичного зразка.

Спочатку розглянемо симетричне навантаження, як це показано у [9].

Кут γ безпосередньо вводиться у кут повороту ТМЕДН ξ . Тоді кут нахилу (ТМЕДН ξ)

$$\alpha_\xi = \frac{\pi}{4} + \frac{\rho}{2} + \beta_\xi + \gamma, \quad (1)$$

де ρ – кут внутрішнього тертя; β_ξ – кут повороту ТМЕДН ξ від контактного тертя.

ТМЕДН ξ'_n повертається відносно вісі x на кут γ . Цей кут вводиться в експоненти рівнянь системи [9], базовими рівняннями якої є визначення вертикального напруження у вершині тріщини

$$\sigma_{y\xi} = \frac{1}{\mu} \left[\frac{k_n(1 + \mu d) \left(1 + \sin \rho \sqrt{1 - b_\xi^2}\right) \cdot \exp(2\mu(\beta_\xi + \beta_b))}{1 - \sin \rho \sqrt{1 - b_b^2}} - k_b \right]; \quad (2)$$

$$\text{де } k_b = \frac{(k_n + \mu \sigma_{y\xi}) \left(1 - \sin \rho \sqrt{1 - b_\xi^2}\right)}{(1 + \mu d) \left(1 + \sin \rho \sqrt{1 - b_b^2}\right) \exp(-4\mu\beta_b)}, \quad b = f\sigma_y / (k + \mu\sigma_y), \quad (3)$$

де μ – коефіцієнт внутрішнього тертя; k_n – межа міцності на зсув; f – коефіцієнт контактного тертя.

Після підстановки кута γ рівняння будуть мати вигляд

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_{y\xi} &= \frac{1}{\mu} \left[\frac{k_n(1 + \mu d) \left(1 + \sin \rho \sqrt{1 - b_\xi^2}\right) \cdot \exp(2\mu \cdot (\beta_\xi + \beta_{b'} + \gamma))}{1 - \sin \rho \sqrt{1 - b_{b'}^2}} - k_{b'} \right]; \\ k_{b'} &= \frac{(k_n + \mu \sigma_y) \left(1 - \sin \rho \sqrt{1 - b_\xi^2}\right)}{(1 + \mu d) \left(1 + \sin \rho \sqrt{1 - b_{b'}^2}\right) \exp(-4\mu \cdot (\beta_{b'} + \gamma))}. \end{aligned} \right. \quad (4)$$

Складніша справа з визначенням параметрів b_ξ і $b_{b'}$ у зв'язку з загасанням дотичних напружень всередині зразка, оскільки діаметр горизонтального перерізу вздовж осі ординат у весь час зростає згідно з формулою

$$a_i = a_1 + 2y \cdot \text{tg } \gamma, \quad (5)$$

де a_1 – діаметр зразка на верхній площині.

Вважаємо, що, базуючись на принципі Сен-Венана про можливість заміну зовнішнього нерівномірного навантаження рівномірним всередині тіла, дотичні напруження в будь-якому горизонтальному перерізі приймаємо постійними. Тоді визначення параметрів b_ξ і b_b та з розподілом нормальних

напружень у горизонтальних перерізах зразка розраховуємо за лінійним законом за Л. Прандтлем. Скоригуємо його з урахуванням загасання максимального коефіцієнта контактної тертя за перерізами зразка. Тоді згідно з ними залежність розподілу нормальних напружень має вигляд

$$\sigma_{y_i} = \sigma_{y_0} \left(1 + \frac{2f_\kappa}{1 + \frac{2y \cdot \operatorname{tg} \gamma}{h}} \cdot (x + y \cdot \operatorname{tg} \gamma) \right) / \left(1 + 2 \frac{y \cdot \operatorname{tg} \gamma}{h} \right), \quad (6)$$

де σ_{y_0} – нормальне напруження в точках a і a' ; h – висота зразка. Залежність розподілу дотичних напружень –

$$\tau_{xy} = \frac{f_\kappa \sigma_{y_i}}{\left(1 + \frac{2y \cdot \operatorname{tg} \gamma}{h} \right)}. \quad (7)$$

Враховуючи незалежність від абсциси та залежність від ординати, додамо параметрам b_ξ і b_b , наступний вигляд

$$b_\xi = \frac{f_\kappa \left(1 - \frac{2y}{h} \right) / \left(1 + \frac{2y \cdot \operatorname{tg} \gamma}{h} \right) \cdot \sigma_{y_\xi}}{k_n + \mu \sigma_{y_\xi}}; \quad (8)$$

$$b_b = \frac{f_\kappa / \left(1 + \frac{2y \cdot \operatorname{tg} \gamma}{h} \right) \cdot \sigma_{y_\xi}}{k_n + \mu \sigma_{y_\xi}}. \quad (9)$$

Введенням дільників $(1+2y \operatorname{tg} \gamma)$ та $(1+2h \operatorname{tg} \gamma)$ ми враховуємо збільшення чи зменшення діаметра конусного зразка, першим дільником – усередині зразка, другим на нижній (опорній) поверхні. Відносний несучий майданчик при розвитку тріщин визначається за формулою

$$S_i = \frac{a_1 - 2x + 2y \cdot \operatorname{tg} \gamma}{a_1 + 2y \cdot \operatorname{tg} \gamma}. \quad (10)$$

Тоді формула для розрахунку питомого зусилля з урахуванням зміни розмірів горизонтальних перерізів зразка буде мати вигляд

$$p = \sigma_{y_\xi} \left((x \cdot \operatorname{tg} \gamma + 0,5a_1 - x) + \frac{f_\kappa \left(1 + 2 \frac{y \cdot \operatorname{tg} \gamma}{h} \right) \cdot (y \cdot \operatorname{tg} \gamma + 0,5a_1 - x)^2}{h} \right) / (a_1 - 2x + 2y \cdot \operatorname{tg} \gamma). \quad (11)$$

Тепер за формулами (10) і (11) з використанням залежності деформації від питомого зусилля $\epsilon = p/E$, де E – модуль пружності, будемо повні криві діаграми «напруження – подовжня деформація» (рис. 3) при різних значеннях кута γ , та різних формах зразків.

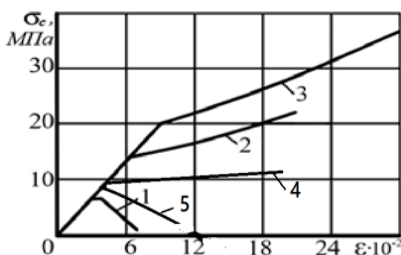


Рисунок 3 – Діаграма «напруження- деформация» рівностороннього та нерівносторонніх зразків при $k_n=1,0$ МПа; $\rho=45^\circ$: 1– $\gamma=0$; 2 – $\gamma=0,5$; 3 – $\gamma=0,7$ (рис.1) при $k_n=1,0$ МПа; $\rho=45^\circ$: 4 - $\gamma=0,5$ (рис.2,а) та 5 - $\gamma=0,5$ і $\gamma= - 0,3$ (рис.2,б)

З діаграми можна зробити висновок про суттєве зростання несучої здатності зразка зі збільшенням нижньої опорної полщини зі збільшенням кута γ згідно рис.1. У нерівносторонніх зразків (рис.2, а і б) також зі збільшенням нижньої опорної полщини є зростання несучої здатності.

У роботі [10] наведено експериментальні дані щодо руйнівного навантаження, при якому утворюється перша тріщина в усічено-конусних зразках, виготовлених з вугілля та цементу. Автором були виготовлені три партії зразків з донецького вугілля при різних співвідношеннях між вугіллям та цементом у співвідношенні 1:(0,3÷1). У межах партії склад зразків залишався постійним. Кожну партію зразків виготовляли шляхом заливання спеціальних форм із органічного скла масою однакового складу з вугілля, цементу та води. Результати дослідів для рівностороннього зразка показано на рис. 4.

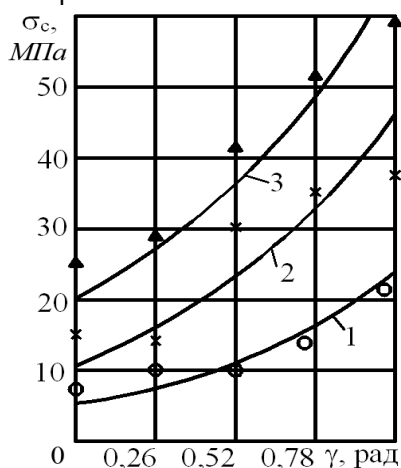


Рисунок 4. – Залежності руйнівних контактних напружень при стисненні усіченно-конусних зразків (на цементі) від кута γ для рівностороннього зразка (рис.1.)

1 – $k_n=1,0$ МПа, $\rho=40^\circ$, $f_k=0,15$; 2 – $k_n=2,2$ МПа, $\rho=40^\circ$, $f_k=0,25$; 3 – $k_n=3,3$ МПа, $\rho=40^\circ$, $f_k=0,15$

Автор книги наводить експериментальні дані залежно від кутів γ , на жаль, без значень необхідних для розрахунку параметрів – k_n , ρ , f_k , E .

Напруження, при яких виникає перша тріщина, автор називає руйнівними.

Зіставлення розрахункових кривих, побудованих на ймовірних значеннях параметрів k_n , ρ , f_k , свідчить про задовільну їхню збіжність з експериментальними даними. Так, збіжність кривих 1, 2 становить 82-87%, кривої 3 – 72-75%.

У усічено-конусних зразків змінюється і характер кутів тріщиноутворення порівняно із зразками правильної форми. Автор книги пише, що при руйнуванні усічено-конусних зразків виникають радіальні тріщини внаслідок розриву зовнішнього кільця матеріалу внутрішніми конусами (позначені для трьох партій крапками, хрестиками та трикутниками). Природно, ТМЕДН формують радіальні тріщини.

Зі твердженням автора книги, що руйнація відбувається внаслідок розриву кільця матеріалу внутрішніми конусами ми не можемо погодитися, оскільки немає сил, що розтягують. За нашим поданням та математичним моделюванням на підставі критерію Кулона з урахуванням контактної тертя руйнація відбувається за рахунок зсувних деформацій.

Аналогічно за наведеною методикою моделюємо руйнування усічено- конусних зразків при асиметричному навантаженні [11]. З урахуванням формул (4-10) де при $y > 0.5 h$ приймаємо $f_k = - f_k$ (так враховуємо асиметрію навантаження) будемо залежності меж міцності від кута конусності при асиметричному розподілі контактних дотичних напружень

На рис.5 для порівняння наведені залежності меж міцності від кута конусності при симетричному і асиметричному розподілі контактних дотичних напружень для зразків рівносторонньої форми (рис 1).

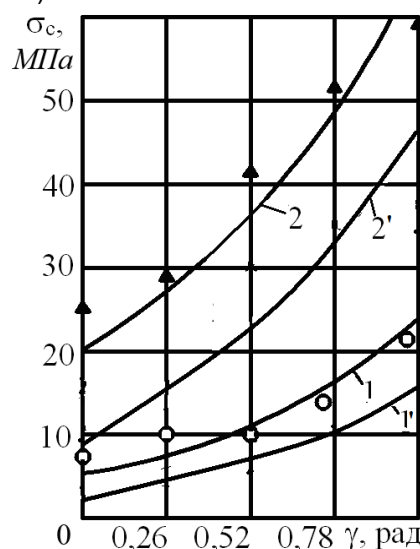


Рисунок 5 – Залежності руйнівних контактних напружень при стисненні усічено-конусних зразків з вугілля (на цементі) від кута γ при симетричному (1, 2) та асиметричному навантаженні (1', 2')

1 – $k_n=1,0$ МПа, $\rho=40^\circ$, $f_k=0,15$; 2 – $k_n=3,3$ МПа, $\rho=40^\circ$, $f_k=0,15$

Висновки. Розрахунки свідчать, що під впливом руйнівних контактних напружень міцність призматичних усічено-конусних зразків на стискання при асиметричному навантаженні (рис. 5, криві 1', 2') має значення в 1,8 -2,0 рази менше в порівнянні з симетричним навантаженням (рис. 5,

криві 1, 2). Це з одного боку підтверджує збільшення міцності усічено-конусних зразків при стисканні від кута γ , а з другого боку зниження міцності від асиметрії навантаження.

Список літератури

1. Білецький В.С., Олійник Т.А., Смирнов В.О., Скляр Л.В. Техніка та технологія збагачення корисних копалин. Частина І. Підготовчі процеси. – Кривий Ріг: Видавець ФОП Чернявський Д.О., 2019. –200 с.
2. Блохин В.С., Большаков В.И., Малич Н.Г. Основні параметри технологічних машин. Машини для дезінтеграції твердих матеріалів: Учебное пособие, ч.1. Днепропетровск: ИМА-пресс, 2006. 404с. – Рос. мовою.
3. Барон, Л.И. Гірничо-технічне породознавство. М.: Наука, 1977. – 324с. – Рос. мовою.
4. Виноградов В.В. Геомеханіка управління станом масиву поблизу гірничих виробок.– К.: Наукова думка, 1983.– 192 с. – Рос. мовою.
5. Шашенко О.М., Сдвижкова О.О., Гапеев С.М. Деформованість та міцність масивів гірських порід: Монографія. – Д.: Національний гірничий університет, 2008. – 224 с. – Рос. мовою.
6. Mingqing, Y. Mechanical characteristic of the exponential strength criterion under conventional stresses / Y. Mingqing. *Int J Rock Mech Min Sci.* – 2010. – Vol. 47. – Iss. 2. – P. 195-204.
7. Erik Eberhardt, The Hoek–Brown Failure Criterion / Erik Eberhardt. *Rock Mechanics and Rock Engineering* – 2012. – Vol. 45 – Iss. 6 - pp 981–988.
8. Томленов, А.Д. Теорія пластичного деформування металів. М.: Металлургия, 1972. – 480 с. – Рос. мовою.
9. Механіка утворення форм руйнування зразків гірських порід: монографія / Васильев Л.М., Васильев Д.Л., Малич Н.Г., Ангеловский А.А. – Дніпро: ИМА-пресс, 2018. 172с. – Рос. мовою.
10. Одинцов В.Н. Відривне руйнування масиву скельних гірських порід М.: Ипкон. РАН. 1996.- 165с. – Рос. мовою.
11. Маліч М.Г. Енергетичний аналіз дроблення рудних матеріалів асиметричним навантаженням. *Теорія і практика металургії*. Дніпро. НМетАУ. 2022. №3. С. 38-44.

УДК

Кравченко В.П., Гладких В.А., Аносов О.В., Рубан А.В., Рябцев О.О.
Аналіз якості шихтових матеріалів при виробництві
висококремнистого феросиліцію.

Kravchenko V.P., Gladkikh V.A., Anosov O.V., Ruban A.V., Ryabtsev O.O.
Analysis of the quality of charge materials in the production
of high-silicon ferrosilicon.

Анотація. Феросиліцій виробляють шляхом відновлення кремнію, що міститься у кварциті, твердими вуглецевими відновниками у присутності заліза. Головними компонентами шихти для виробництва феросиліцію є кварцит, вуглецевий відновник та сталева стружка, до яких висуваються жорсткі вимоги по фракції, вмісту шкідливих домішок, електропровідності. Високовідсоткові марки феросиліцію найбільш чутливі до якості відновника. У сучасній металургії відбулись зміни якісних характеристик коксової продукції в наслідок впровадження у доменному виробництві технології пилувугільного палива (ПВП), яке застосовується в доменній плавці як добавка, що призвело до зміни вимог до доменного коксу, а саме – необхідності зниження хімічної активності та збільшення гарячої міцності коксу. Таким чином, одним з можливих напрямків оптимізації технології виплавки феросиліцію в умовах АТ "ЗФЗ" є підбір відновлювальних сумішей, що складаються з різних вуглецевмісних матеріалів та задовольняють вимоги феросплавного виробництва щодо співвідношення показників реакційної здатності (CRI) та міцності коксу після реакції (CSR).
Ключові слова: ФЕРОСИЛІЦІЙ, ШИХТА, ВІДНОВНИК, РЕАКЦІЙНОЇ ЗДАТНОСТІ, ГАРЯЧА МІЦНІСТЬ.

Abstract. Ferrosilicon is produced by reducing the silicon contained in quartzite with solid carbon reducing agents in the presence of iron. The main components of the charge for the production of ferrosilicon are quartzite, carbon reducing agent and steel shavings, which are subject to strict requirements in terms of fraction, content of harmful impurities, and electrical conductivity. High-percentage grades of ferrosilicon are most sensitive to the quality of the reducing agent. In modern metallurgy, there have been changes in the quality characteristics of coke products as a result of the introduction of pulverized coal fuel (PVP) technology in blast furnace production, which is used in the blast furnace as an additive, which has led to changes in the requirements for blast furnace coke, namely, the need to reduce chemical activity and increase hot strength coke. Thus, one of the possible directions of optimization of ferrosilicon smelting technology in the conditions of JSC "ZFZ" is the selection of reducing mixtures consisting of various carbon-containing materials and meeting the requirements of ferroalloy production regarding the ratio of reactivity indicators (CRI) and coke strength after reaction (CSR).

Key words: FERROSILICON, CHARGE, REDUCER, REACTIVITY, HOT STRENGTH.

Вступ. Феросиліцій — сплав кремнію із залізом — широко використовується в металургії насамперед для розкислення та легування під час виробництва майже всіх марок сталі. Крім того, високовідсоткові марки феросиліцію (65 % кремнію і

більше, табл. 1) [1] застосовуються у феросплавній промисловості як відновники в силіко-термічному відновленні цілого ряду елементів (V, W, Mo, Nb та ін.).

Таблиця 1
 Феросиліцій. Загальні технічні умови (ДСТУ 4127:2002)

Марка сплаву	Масова частка елемента, %									
	Si				C	S	P	Al	Mn	Cr
	не більше									
ФС90	від	87	до	95 включно	0,2	0,02	0,04	3,5	0,5	0,2
ФС75	понад	74	»	80 »	0,2	0,02	0,05	3,0	0,5	0,5
ФС70	»	68	»	74 »	0,2	0,02	0,05	2,5	0,5	0,5
ФС65	від	63	»	68 »	0,2	0,02	0,05	2,5	0,5	0,5

Найбільш затребуваними марками є ФС65 та ФС75.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Феросиліцій виробляють шляхом відновлення кремнію, що міститься у кварциті, твердими вуглецевими відновниками у присутності заліза (вуглецевотермічний спосіб). Реальний процес відновлення кремнію включає утворення в якості проміжних продуктів монооксиду карбиду

кремнію. Схематично процес відновлення кремнезему кварциту вуглецем наведено на рис.1.

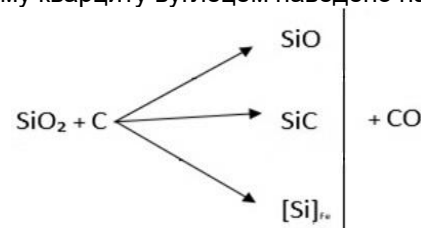


Рисунок 1. Схема процесу відновлення кремнезему кварцитом вуглецем [2].

Залізо сприятливо впливає на перебіг реакції відновлення. Розчиняючи кремній, воно виводить його із зони реакції та сприяє руйнуванню карбїду кремнію. У механізмі реакції відновлення кремнію однаково важливою є участь ряду сполук: SiO_2 , SiC , SiOгаз , C і CO . Феросиліцій виплавляють безперервним способом у рудовідновлювальних печах закритого та відкритого типу потужністю від 22,5 до 63 МВА [2, 3].

Головними компонентами шихти для виробництва феросиліцію є кварцит, вуглецевий відновник та сталева стружка. Також необхідним компонентом шихти при виробництві високовідсоткових марок є тріска деревини, яка виступає в ролі відновника-розпушувача, що забезпечує газопроникність колошника і стабільність газодинамічного режиму. При виплавці феросиліцію з підвищеним вмістом Si при високій температурі і в залежності від якості вихідної сировини можливий розвиток процесів раннього шлакоутворення та "закупорювання колошника". Щоб уникнути спікання шихти на колошнику, можуть застосовуватися печі з круглою ванною, що обертається. Ванна здійснює один оберт за 24-48 год (при виплавці

низькокремнистого феросиліцію швидкість обертання має більш високе значення), обертання здійснюється реверсивно в секторі 60-120 °С.

Кварцит є компонентом шихти, що містить корисний елемент – кремній, який в свою чергу міститься в мінералі в складі діоксиду кремнію. Кремній займає друге місце після кисню по розповсюдженню в земній корі і зустрічається практично всюди. Менше з тим, при виробництві феросиліцію можуть бути використані тільки високоякісні матеріали, які повинні відповідати певним вимогам за вмістом основної сполуки та домішок. Так, для кварцитів існують наступні вимоги: масова доля SiO_2 не менше 97%, масова доля Al_2O_3 не більше 1,8% та інше (глина, пісок, тощо) не більше 1%.

Аналіз діаграми стану системи Al_2O_3 - SiO_2 (рис.2) свідчить, що мінімальна добавка Al_2O_3 різко знижує температуру початку плавлення суміші, і при вмісті 5,5% Al_2O_3 вона дорівнює 1585°С, що порівняно з чистим SiO_2 - 1723°С, зниження температури становить 138°С [5]. При допустимому вмісті Al_2O_3 1,8% кількість рідкої фази складе 33%. При вмісті Al_2O_3 до 1% утворюється лише приблизно 18% рідкої фази [4,5].

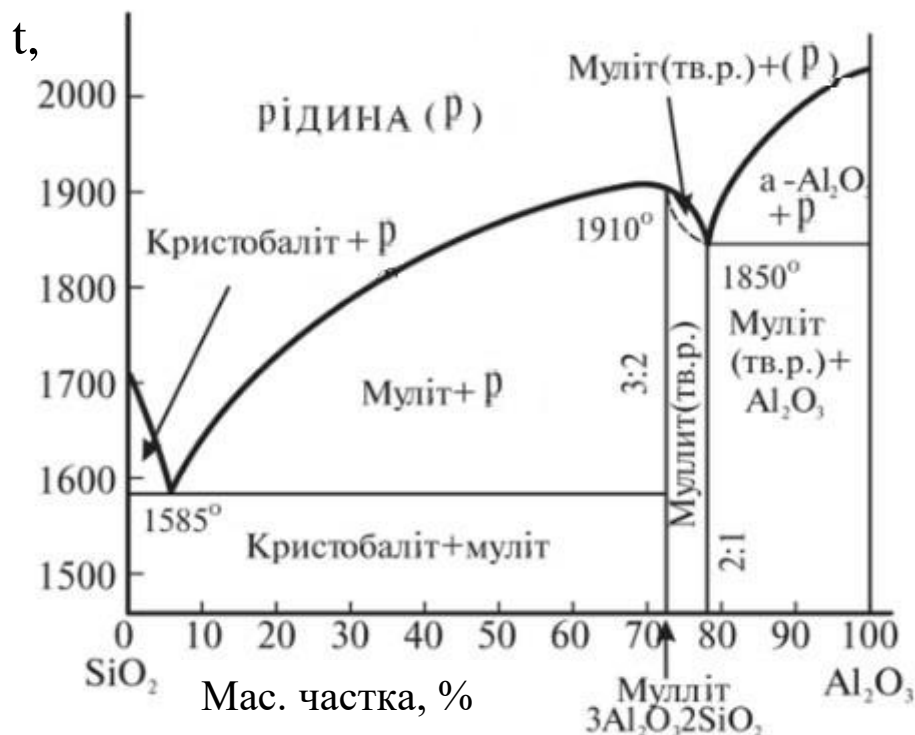


Рисунок 2. Діаграма стану системи Al_2O_3 - SiO_2

При виплавці феросиліцію з підвищеним вмістом Si температура термодинамічної рівноваги коливається в межах 1560-1620°С, а температура реального процесу становить 1620-1730°С [7], присутність у кремнеземі до 2% Al_2O_3 може призвести до порушення технологічного перебігу процесу через розм'якшення кварциту та спікання

колошника. Крім того, висока концентрація Al_2O_3 може призвести до збільшення вмісту Al у сплаві, що значно знижує його конкурентоспроможність та використання при отриманні електротехнічних сталей. Так вміст Al_2O_3 в кварциті на рівні 2% призводить до підвищення кремнію в металі до 2% [8].

В якості залізовмісного компоненту при виробництві феросиліцію традиційно використовується сталева стружка від нелегованих марок сталі, яка повинна бути сипучою. У зв'язку з наростаючим дефіцитом сталевої стружки в останні роки використовують чавунну стружку і, навіть, матеріали, в яких залізо знаходиться в оксидній формі – залізу руду, залізорудні обкотиші, брикетовану окалину та ін.

Вуглецевий відновник є другим після кварциту найважливішим компонентом шихти. Він має відповідати певним вимогам:

1. Оптимальне співвідношення реакційної здібності вуглецю та фізичних властивостей для використання у феросплавних печах (фракція, міцність, вміст летких речовин тощо).
2. Прийнятна (відносно невисока) електропровідність.
3. Фракційний склад.
4. Мінімально можливий вміст шкідливих домішок.
5. Стабільність якості.
6. Вартість.

Мета і завдання досліджень. Високовідсоткові марки феросиліцію найбільш чутливі до якості відновника у зв'язку з більш високими обмеженнями щодо домішок у порівнянні з низьковідсотковими, а також у зв'язку з технологічно більш складним перебігом процесів відновлення кремнію. При виплавці феросиліцію з вмістом кремнію вище 65% в якості відновника іноді частково застосовується деревне вугілля. Для марок з нижчим вмістом кремнію донедавна, як основний вуглецевий відновник, використовувався коксовий горішок.

Коксовий горішок (10-25 мм) - одна з фракцій, що утворюються при подрібненні та розсіві «коксового пирога» під час виробництва металургійного коксу. Горіх довгий час був найбільш дешевим, доступним і поширеним відновником. Він застосовується у всіх процесах, де допускається використання відновника із відносно високою зольністю (вміст золи 10-15 %).

У доменному виробництві останніми роками спостерігається стійка тенденція залучення до процесу більш дрібних та вузьких класів коксу [8]. Постійне прагнення поліпшення фізико-механічних властивостей доменного коксу, збільшення його виходу для задоволення вимог сучасного доменного виробництва призвело до зниження частки дрібних фракцій від загального виходу коксової продукції.

Особливу роль в частині зміни якісних характеристик коксової продукції відіграло впровадження у доменному виробництві технології пиловугільного палива (ПВП), яке застосовується в доменній плавці як добавка. Технологія ПВП призвела з одного боку, до економії коксу, який частково витрачався в доменному процесі як паливо, з іншого боку – до зміни вимог до доменного коксу. Зокрема, до необхідності зниження хімічної

активності та збільшення гарячої міцності коксу для того, щоб кокс досягав горна доменної печі, руйнуючись і не окислюючись. У феросплавному виробництві кокс виступає виключно як відновник, а зниження хімічної активності призводить до погіршення умов відновлення кремнію.

Галузеві стандарти на коксовий горішок регламентують лише показники зольності та вміст дрібняка <10 мм. За вмістом сірки, фосфору та виходу летких речовин (V^r) коксовий горішок повинен відповідати вимогам, передбаченим для цих показників стандартами на доменний кокс. При цьому не враховуються хімічна активність та питомий електроопір, а також низка інших властивостей. Оцінка коксового горішка за чинним стандартом не повною мірою характеризує його як відновника для електропічної виплавки феросплавів.

Таким чином, незважаючи на поширення, в поточних умовах кам'яновугільний коксовий горіх, який отримується в результаті розсіву коксового пирога, і тим більше доменний кокс, не є найкращими відновниками. Якісні характеристики коксового горіха не завжди відповідають специфічним вимогам технології феросплавного виробництва. При цьому якість коксового горішка, його електроопір, пористість, хімічна активність можуть сильно коліватися в залежності від застосованого кам'яного вугілля і режиму коксування.

Значна частина закордонних виробників вирішували питання оптимізації відновника шляхом переходу на використання вугілля певних родовищ або у складі сумішей, або навіть до 100% використання. Досить часто використання вугілля обмежене екологічними вимогами чи технологічними особливостями, що мають місце на тому чи іншому підприємстві. Наприклад, закриті печі, високопотужні печі, конструкції газоочищення, особливості систем подачі сировини тощо.

Для «компенсації» недоліків, властивих традиційному коксовому горіху, як відновнику при виробництві феросплавів, українські підприємства також прагнуть застосування різних вуглецевмісних матеріалів. Зокрема, також опрацьовується додавання до відновної частини вугілля довгопламенної та газової групи місцевих родовищ, а також розглядаються можливості виробництва коксу зі специфічними властивостями, що задовольняють вимоги феросплавного виробництва щодо співвідношення показників реакційної здатності (CRI) та міцності коксу після реакції (CSR).

АТ "Запорізький Завод Феросплавів" (далі по тексту - АТ "ЗФЗ") експлуатує закриті печі з мокрою системою очищення газів, що відходять, у зв'язку з чим має об'єктивні обмеження щодо використання вугілля. Одним з можливих напрямків оптимізації технології виплавки феросиліцію в умовах АТ "ЗФЗ" є підбір відновлювальних сумішей, що складаються з різних вуглецевмісних матеріалів. У табл. 2 наведена стисла характеристика

вуглецевих відновників, що використовувалися на АТ "ЗФЗ" для феросиліцію протягом останніх років.

Таблиця 2
Вуглецеві відновники, що використовувались на АТ «ЗФЗ»

Країна виробник	Продукція	Фракція, мм	Волога, %	Зола, %	Леткі, %	Сірка, %
Україна	кокс	25+	5	15	-	-
	коксівий горіх	10-35/10-25	20	15	-	-
Польща	кокс	20-40/25-80	13	15	1,2	1,2
	коксівий горіх	10-25	15	15	1,4	1,2
Чехія	кокс	20-40	14	15	1,8	0,7
	коксівий горіх	10-25	15	15	1,8	0,8
Колумбія	коксівий горіх	10-30	9	14	2	0,8
Польща	вугілля Г/ДГ	5-25/10-50	12	10	41	1,4
		16-50/16,5-31,5	10	8	36	1,4
Україна	вугілля Г/ДГ	13-25/13-100	12	10	38	-

Отримання вуглецевих відновників, що відповідають вимогам електротермічних виробництв, є актуальним питанням і досить складною проблемою.

Поки що немає оптимального та загальновибраного рішення ні в теоретичному, ні в практичному аспектах. Однією з причин становища можна вважати відсутність єдиних поглядів на проблему спеціальних видів відновника (роль вуглецю в відновлювальних процесах, комплекс основних фізико-хімічних і фізико-механічних властивостей та ін.), незважаючи на наявність порівняно великого числа робіт у цьому напрямку.

Для подальших досліджень необхідно:

- поглиблений аналіз вуглецевих відновників, доступних АТ "ЗФЗ";
- їх якісні характеристики (критичні та бажані) у застосуванні до потреб виробництва при виплавці високівідсоткового феросиліцію в умовах АТ "ЗФЗ";
- формування об'єктивних параметрів якісної відновлювальної суміші;
- розробка рекомендацій щодо структури забезпечення вуглецевими матеріалами;
- оцінка ефективності запропонованих заходів.

Висновки. Показано, що вміст Al_2O_3 у кварциті значно впливає на його фізикохімічні властивості: присутність 1% Al_2O_3 сприяє утворенню до 18% рідкої фази при температурі евтектики (5,5% Al_2O_3) 1585 °С; наявність у кварциті 1,8 Al_2O_3 вже викликає утворення 33% рідкої фази при тій же температурі. Присутність 1,8% Al_2O_3 у кварциті призводить до підвищення вмісту Al в сплаві до 2%, що знижує якісну цінність цього сплаву та обмежує його використання для виплавки електротехнічних сталей. Досвід АТ "ЗФЗ" свідчить, що результати застосування у технології виплавки феросиліцію коксового горішка різних виробників можуть значно відрізнятися, при цьому стандартні показники якості можуть бути близькими або навіть однаковими. Існуючі стандарти, що регламентують якість коксу і вугілля не повною мірою характеризують їх властивості як відновників для виробництва феросплавів. З урахуванням об'єктивної зміни характеристик коксу, що виробляється, та в умовах постійного зростання ціни електроенергії питання підбору оптимального відновника для виплавки феросиліцію набуває особливої актуальності та вимагає глибокого аналізу.

Бібліографічний опис:

1. В.Л. Зубов, М.І. Гасик. Електрометалургія феросиліцію. Дніпропетровськ: Системні технології, 2002. – 704 с.
2. В.Л. Зубов, М.І. Гасик, А.М. Овчарук. Структурні параметри, вуглехімічні та металургійні властивості вуглецевих відновників для виробництва феросплавів. Дніпропетровськ: Національна металургійна академія України, 2011. – 158 с.
3. Підручник
4. М.І.Гасик, М.П. Лякішев. Фізикохімія і технологія електроферосплавів. Підручник для ВНЗ. Дніпропетровськ: ДНВП Системні технології, 2005. – 448 с.
5. Фізична хімія силікатів / А. А. Пащенко, А. А. М'ясников, Є. А. М'ясникова та ін; за ред. О. О. Пащенко. - М.: Вищ. шк., 1986. - 368 с.
6. Зайцев А.І., Литвина О.Д., Могутнов Б.М. Термодинамічні властивості муліта $3Al_2O_3-2SiO_2$ // Неорганічні матеріали. - 1995. - Т. 31, № 6.-С.768
7. Шорніков С. І., Арчаков І. Ю., Чемякова Т. Ю. Мас-спектрометричне дослідження процесів випаровування та фазових рівноваг у системі $Al_2O_3-SiO_2$.// Журнал фізичної хімії.2000, том 74, №5, с. 775-782

8. Ейтель В. Фізична хімія силікатів. Перекл. з англ. М: Іноземна література. 1962. - 1055с.
9. Шорніков С. І., Арчаков І. Ю., Мас-спектрометричне визначення термодинамічних властивостей розплавів системі $Al_2O_3-SiO_2$.// Журнал фізичної хімії. 2000, том 74, №5, з. 783-788.

УДК 669.162.24:621.928.2

Засельський В. Й., Пополов Д. В.

Перспективні конструкції грохотів для підвищення якості підготовки шихтових матеріалів перед спіканням і плавкою

Zaselskyi V., Popolov D.

Prospective designs of screens for improving the quality of charge materials preparation before sintering and melting

Метою дослідження було знайти та запропонувати шляхи підвищення якості підготовки металургійної шихти до доменної плавки за рахунок зменшення вмісту дріб'язкової фракції та стабілізації гранулометричного складу перероблюваного матеріалу на вібраційних грохотах.

У ході дослідження було проведено аналіз роботи існуючого обладнання для відсіву некондиційних фракцій з металургійної шихти та заходи по стабілізації її гранулометричного складу в часі. Також розглядалися та аналізувалися нові технічні рішення зі створення вібраційно-ударних грохотів, здатних підвищити якість підготовки металургійної шихти до доменної плавки.

Дослідження виявило, що традиційні вібраційні машини з центромасними вібраторами та резонансні грохоти не можуть забезпечити необхідної ефективності відсіву через забиття сіячих поверхонь. Запропоновано конструкцію вібраційно-ударного грохоту з вільно укладеним ситом, що забезпечує ударно-імпульсний режим роботи, який сприяє інтенсивному розрихленню та перемішуванню матеріалу. Це забезпечує посилення сегрегаційних процесів в шарі агломерату, що дозволяє знизити забиття сіячих поверхонь до 8...15% і підвищити ефективність грохочення до 78...85%, що відповідає сучасним вимогам щодо підготовки шихти до доменної плавки.

Розроблене технічне рішення дозволяє значно підвищити якість підготовки металургійної шихти до доменної плавки без зниження надійності обладнання. Впровадження такої конструкції грохоту сприятиме зниженню енергоємності процесів підготовки шихти, покращенню якості кінцевої продукції та зниженню виробничих витрат. Що, в свою чергу, дозволить підвищити конкурентоспроможність підприємств металургійної галузі.

Ключові слова: розсів, вібраційний грохот, ударно-імпульсний режим, вільно укладене сито.

The aim of the study was to find and propose ways to improve the quality of metallurgical charge preparation for blast furnace smelting by reducing the content of fines and stabilizing the particle size distribution of the processed material on vibrating screens.

The study analyzed the operation of existing equipment for screening out substandard fractions from the metallurgical charge and measures to stabilize its particle size distribution over time. Also, new technical solutions for the creation of vibration-impact screens capable of improving the quality of preparation of metallurgical charge for blast furnace smelting were considered and analyzed.

The study revealed that traditional vibrating machines with center-mass vibrators and resonant screens cannot provide the required screening efficiency due to clogging of the screening surfaces. The design of a vibrating-impact screen with a loosely stacked sieve is proposed, which provides a shock-pulse mode of operation that promotes intensive loosening and mixing of the material. This enhances segregation processes in the agglomerate layer, which reduces clogging of the screening surfaces to 8...15% and increases screening efficiency to 78...85%, which meets modern requirements for the preparation of the charge for blast furnace smelting.

A new design of a vibration-impact screen is proposed, which is characterized by the presence of a loosely stacked sieve that generates periodic shock-pulse oscillations. This ensures increased dynamic activity of the screening surface and its self-cleaning, which can significantly increase the screening efficiency.

The proposed technical solution can significantly improve the quality of metallurgical charge preparation for blast furnace smelting without reducing equipment reliability. Implementation of the proposed screen design will help reduce the energy intensity of the charge preparation processes, improve the quality of the final product and reduce production costs. This, in turn, will increase the competitiveness of metallurgical enterprises.

Keywords: screen sizing, vibration screen, shock-pulse oscillations, loosely stacked sieve.

Вступ

Коксохімічне та аглодоменне виробництва на сьогоднішній день є найпотужнішими і енергоємними ділянками в металургійній галузі, від котрих суттєво залежить собівартість готової продукції. В свою чергу перераховані металургійні виробництва залежать від якості підготовки шихтових матеріалів, котрі підлягають спіканню та плавці. Головним чинником ефективної підготовки шихтових матеріалів перед спіканням і плавкою є операція відсіву некондиційних фракцій залізородної сировини 0...5 мм та коксу 0...25 мм. Для операції відсіву некондиційних фракцій використовується багато різноманітних грохотів, але на сьогодні ефективність їх роботи не дозволяє суттєво підвищити

ефективність підготовки шихтових матеріалів через забиття сіячої поверхні.

Тому роботи направлені на знайдення рішень, які б дозволили зменшити забиття сіячих поверхонь грохотів і підвищити їх ефективність грохочення є актуальними і своєчасними.

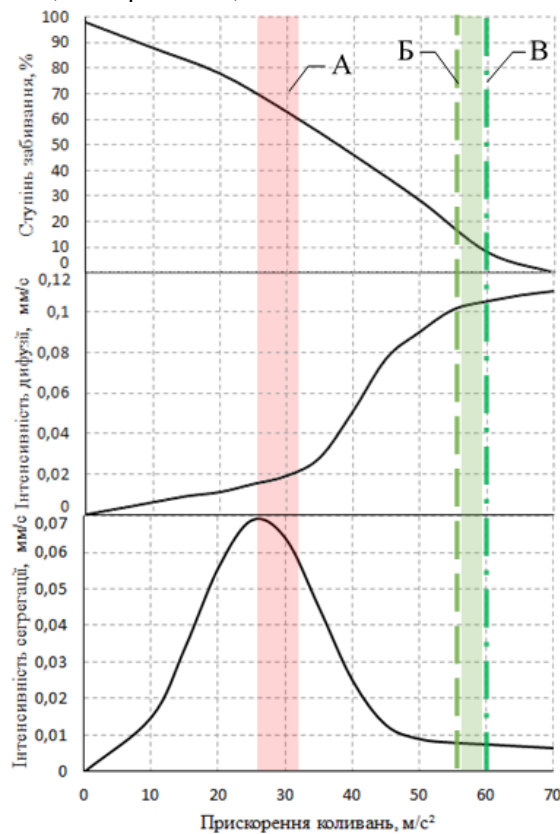
Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Найбільш поширеними грохотами, що використовуються в гірничо-металургійній галузі для видалення дріб'язку з металургійної шихти, є центромасні вібраційні машини, працюючі в зарезонансній області. Такі машини відрізняються простотою конструкції, гарною віброізоляцією, досить високою стабільністю робочого режиму. Проте

інтенсивність дії робочого органу на матеріал у таких грохотів невисока і розподілена по стадіях випадковим чином. Також випадковим чином, незалежно від властивостей матеріалу, що розсівається, прийняті кінематичні параметри робочого органу. [1-6]

Аналіз інтенсивності внутрішньощарових процесів [7] та ступеня захараченості сіячої поверхні [8] від прискорень коливань, наведений на рис. 1, показує, що шлях доставки дрібних фракцій на контакт з ситом визначається, переважно,

інтенсивністю процесу сегрегації, а ступінь його забивання становить від 58 до 70 %. Таким чином, ефективність грохочення залишається надто низькою від 28 до 50 %, що не задовольняє сучасним вимогам та не дає змогу належним чином підготувати шихтові матеріали до спікання та плавки, оскільки за результатами науково-дослідної роботи [9] доведено, що суттєве зростання технологічних показників доменних печей може бути досягнуто, якщо вона становитиме не менше 70...75 %.



А - діапазон прискорень коливань використовуваних грохотів; Б - прискорення коливань грохоту, що забезпечує не забивання отворів сіячої поверхні при межному класі розсіву 5 мм; В - прискорення коливань грохоту, що забезпечує стабілізацію шару агломерату

Рисунок 1 – Залежність інтенсивності внутрішньощарових процесів та ступеня забивання від прискорення коливань

Такий показник, як вказано в роботі [8], можливо досягнути у випадку зменшення забивання отворів сіячої поверхні, якщо надати їй достатньо велике прискорення, яке, наприклад, становить для фракції агломерату 5 мм – 54 м/с^2 . Окрім забиття сіячих поверхонь грохотів суттєво на ефективність підготовки шихтових матеріалів до плавки впливає їх стабілізація по гранулометричному складу та міцності.

Так, наприклад, стабілізація гранулометричного складу та механічної міцності агломерату здійснюється за рахунок часткового його руйнування під впливом механічних навантажень, що виникають при обробці спеченого шару шихти [10]. Проведені дослідження механізму руйнування [11-16] дозволили встановити, що для стабілізації шару агломерату без часткового руйнування найбільш міцних

фракцій необхідно забезпечити механічну обробку з енергією навантаження на агломерат в $45...50 \text{ Дж/кг}$ на протязі 2...3 хвилин з подальшим зниженням цієї величини по ходу механічної обробки.

Механічна обробка з такою енергетикою в першу чергу спрямована на руйнування в шарі агломерату фракцій +40 мм. Проведений гранулометричний аналіз показав, що для технологічних ліній аглофабрик, в яких передбачено подрібнення пилога агломерату в шоквих або роторних дробарках, клас +40 мм в готовому агломераті відсутній, на відміну від інших технологічних ліній де даний клас присутній у кількості 13...22 % [1414].

Для досягнення вище зазначеного діапазону енергії навантаження на шар агломерату при продуктивності шихтових грохотів від 120 до 600 т/год необхідно забезпечити режим роботи вібраційної

машини, при котрому прискорення коливань становитиме 1784 м/с^2 , а амплітуда коливань 293 мм , що практично реалізувати не можливо. Тому, при використанні агломерату, який включає фракцію $+40 \text{ мм}$ доцільно застосування багатоситного грохоту з метою виділення цієї фракції на одній з дек для подальшого дроблення.

Як показує аналіз формування гранулометричного складу шихтового матеріалу на тракті його подачі в доменну піч [17], стабілізація агломерату в першу чергу повинна полягати в його руйнуванні по чисельним тріщинкам, утворених в шлакових зв'язках або зонах застосування, які є наслідком порушення режиму охолодження, при зусиллі навантаження в $0,1 \dots 1 \text{ Н}$ [16] на сіячій поверхні грохоту. Дані зусилля досягаються за рахунок впливу динамічних навантажень на шар агломерату, що відповідає вібраційному прискоренню $60,8 \text{ м/с}^2$, враховуючи продуктивність грохотів та гранулометричний склад шихти. При таких прискореннях з аналізу залежності, яка наведена на (рис. 1), видно, що в межах від 54 до 61 м/с^2 , при доставці дрібних фракцій на контакт з сіячою поверхнею визначальним є процес дифузії, інтенсивність котрого залежить від вертикальної складової коливань, (саме вони сприяють самоочищенню отворів сит), внаслідок чого ступінь забивання знижується і знаходиться в діапазоні від 8 до 15% , а ефективність грохочення зростає до $78 \dots 85 \%$.

Однак, реалізація таких прискорень можлива при коефіцієнті режиму роботи вібраційної машини $5,5g \dots 6,2g$, що значно перевищує рекомендоване значення в $1,5g \dots 3,5g$ при проектуванні

вібротранспортних установок [17], бо такі високодинамічні режими призводять до значного зниження надійності обладнання, росту їх метало- та енергоємності.

Тому, зважаючи на це, треба знайти шляхи підвищення ефективності роботи вібраційних грохотів які застосовуються для переробки шихтових матеріалів без зниження їх надійності, але мають підвищену динамічну активність сіячої поверхні, здатні до самоочищення та ударно-імпульсної дії на оброблюваний матеріал.

Мета і завдання досліджень

Метою роботи було знайти та запропонувати шляхи підвищення якості підготовки металургійної шихти до доменної плавки за рахунок зменшення вмісту дріб'язкової фракції та стабілізації гранулометричного складу перероблюваного матеріалу на вібраційних грохотах.

Матеріали та методи досліджень

Для досягнення поставленої мети аналізувалась робота діючого обладнання по відсіву некондиційних фракцій з металургійної шихти, а також необхідні заходи по стабілізації її гранулометричного складу в часі. Окрім цього вивчались і аналізувались нові технічні рішення по створенню вібраційно-ударних грохотів, здатних підвищити якість підготовки металургійної шихти до доменної плавки.

Результати досліджень

На рис. 2 наведено основні напрямки вдосконалення конструкцій вібраційних грохотів, які дозволяють суттєво інтенсифікувати процеси грохочення матеріалів.

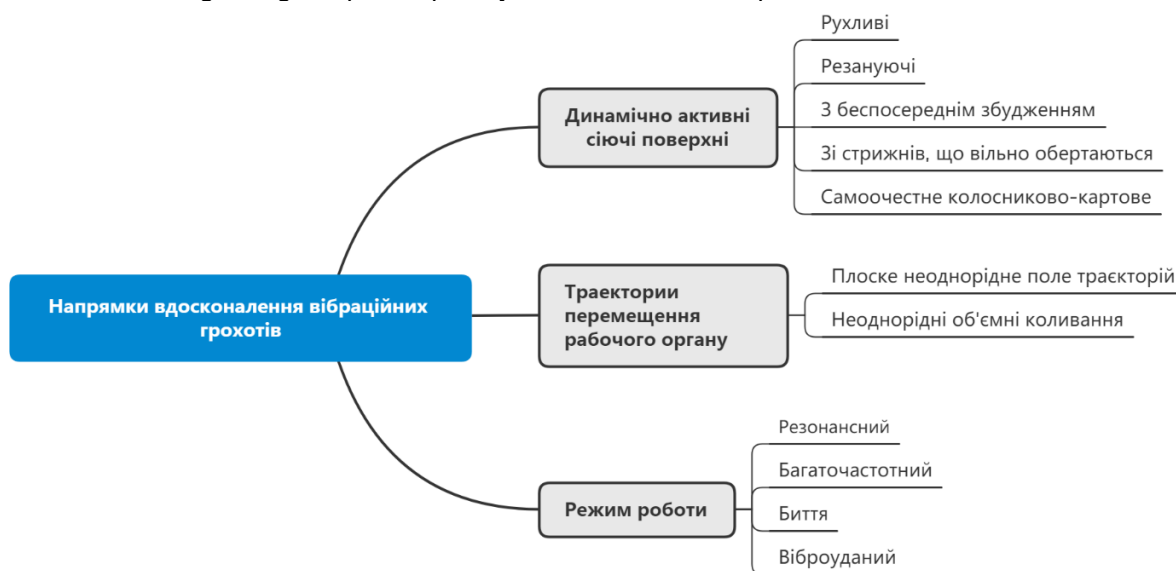


Рисунок 2 – Напрямок вдосконалення конструкції вібраційних грохотів

На підставі виконаного огляду існуючих напрямків підвищення ефективності роботи вібраційних машин, узагальнюючи їх переваги та недоліки можна виділити наступне.

Використання динамічно активних сіячих поверхонь в умовах аглодоменного виробництва не прийнятне, оскільки даний тип сіячих поверхонь

представлений еластичними полімерними ситами, частиною армованих і пружних сит та повністю включаються сита з жорсткими на вигин поверхнями, що просівають, це призводить до швидкого їх зносу високоабразивними шихтовими матеріалами, виключає використання в технологічному процесі гарячого агломерату. Забезпечення

роботи таких сит в діапазоні зворотних деформацій можливе лише за умови натягнення, яке виключає при коливаннях провисання сіячої поверхні, важко реалізується, адже висока продуктивність грохотів зумовлює необхідність транспортування товстого шару шихти, зважаючи на велику насипну щільність шихтових матеріалів, сіяча поверхня сприймає значні навантаження, які спільно з інтенсивним абразивним зносом призводять до провисання поверхні та виходу її з режиму резонансу, або їх руйнації. Таким чином, прийнятною конструкцією сіячих поверхонь для вищезазначених умов є листові сита, які виконані з матеріалу, що має стійкість до абразивного зносу, а їх конструкція високої жорсткості.

Вібраційні машини з неоднорідним полем траєкторій широко використовуються в умовах коксового та аглодоменного виробництва, але ефективність розсіву шихтового матеріалу менша за 70 %, що недостатньо для ефективного функціонування технологічного процесу.

Використання резонансних та багаточастотних грохотів не отримало широкого поширення в умовах коксового та аглодоменного виробництва через значні габарити машин та її маси, оскільки грохоти представлені багатомасними схемами, що не допустимо в умовах підбункерних приміщень.

Робота машин в резонансному режимі призводить до значних динамічних навантажень на металоконструкцію грохоту, що знижує її надійність, та фундамент, це унеможливує використання в якості фундаменту перекриття існуючих конструкцій підбункерних приміщень, а вимагає його встановлення на монолітний фундамент.

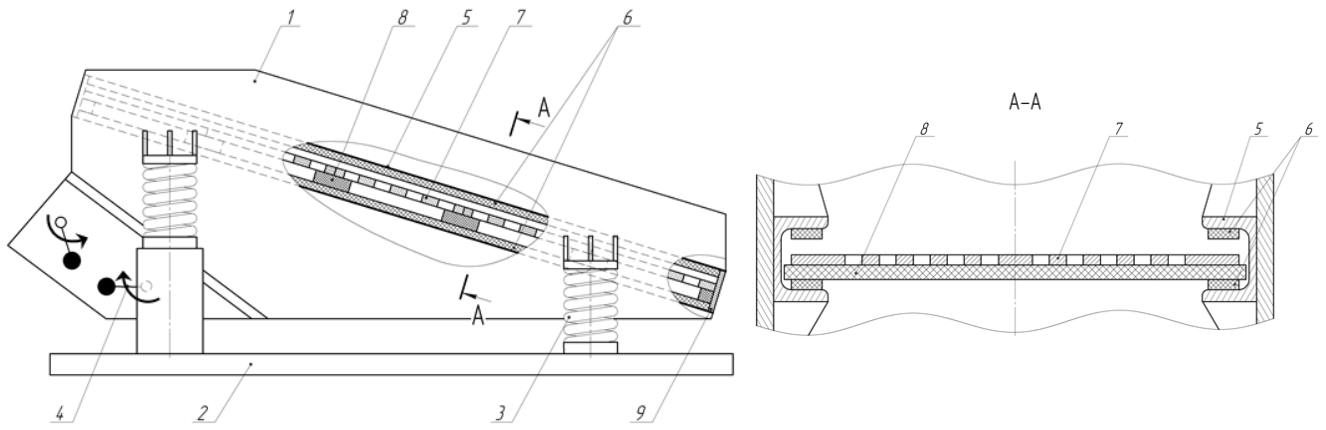
Окрім цього в умовах вищезазначених виробництв навантаженість грохоту може змінюватись в часі в широкому діапазоні (через швидку змінну інтенсивності протікання технологічного процесу грохочення) для збереження резонансного режиму, систему, що коливається, повинно бути піддано регулюванню шляхом зміни пружності амортизаторів, але це дуже важко реалізується в умовах коксового або доменного виробництва.

Вібраційні машини з неоднорідними коливаннями робочого органу з використанням неоднорідно-тимчасового режиму «биття» застосовуються в умовах аглодоменного виробництва, мають достатньо високу ефективність розсівання, але менший міжремонтний період на відміну від вібраційних машин з неоднорідним полем траєкторій, через сприйняття металоконструкцією грохоту значних динамічних навантажень у період переходу в режим «биття», і не завжди забезпечує стабілізацію гранулометричного складу металургійної шихти.

Таким чином, з особливою гостротою стоїть питання створення високоефективних, високопродуктивних грохотів для систем шихтопідготовки, де обмеженість площ підбункерних приміщень не дозволяє встановити грохоти з подовженою сіячою поверхнею, а вимоги до ефективності розсіву дуже високі.

З метою усунення недоліків обладнання, яке використовується для виділення некондиційної частини металургійної шихти на вібраційних грохотах, співробітниками кафедри Інжинірингу з галузевого машинобудування Навчально-наукового технологічного інституту Державного університету економіки і технологій була запропонована конструкція вібраційно-ударного грохоту з вільно укладеним ситом [18], який складається з короба 1 (рис. 3), що спирається на раму 2 через пружні елементи 3 і двох самосинхронізованих вібраторів 4. На бортовинах коробу 1 жорстко закріплені швелероподібні підситники 5, верхня та нижня площини внутрішньої поверхні котрих футерована гумовими амортизаторами 6. В утвореному ними просторі укладене сито, яке складається з карт 7, сполучених між собою гумовими пластинами 8, жорсткість котрих зростає по довжині короба 1 для забезпечення збільшення амплітуди коливань сита у напрямку переміщення матеріалу. В розвантажувальній частині грохоту підситники забезпечені стопорними пластинами 9, які перешкоджають переміщенню сита вздовж коробу 1.

Грохот працює наступним чином. При роботі вібраторів 4 короб 1 здійснює динамічне стійкі лінійно направлені гармонічні коливання, які передаються сити. Завдяки його вільному укладенню в просторі між гумовими амортизаторами 6 забезпечується генерування ним періодичних ударно-імпульсних коливань, причому амплітуда коливань карт 7 по довжині короба у напрямку пересування матеріалу, що розсівається, за рахунок зростання жорсткості гумових пластин 8, збільшується. Забезпечення ударно-імпульсного режиму та неоднорідність амплітуд сприяє інтенсивному розрихленню та перемішуванню матеріалу, що розсівається, це забезпечує посилення сегрегаційних процесів в шарі матеріалу, збільшення швидкості переміщення дрібних фракцій на контакт з ситом 7. Крім цього, ударна взаємодія з верхніми та нижніми площинами внутрішньої поверхні швелероподібних підситників 5 призводить до відриву шару шихти від сит 7 та надає додатковий імпульс частинкам, забезпечуючи його очищення від важко просіваючих фракцій.

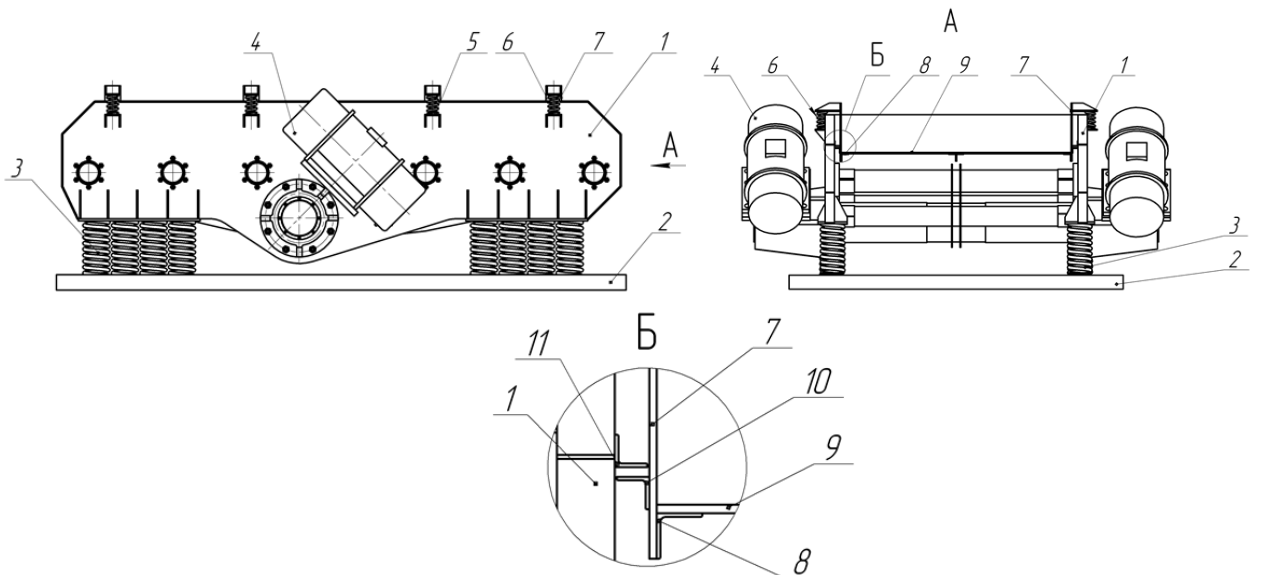


1-короб; 2-рама; 3-пружний елемент; 4-вібратор; 5-підситник;
6-амортизатор; 7-сито; 8-гумова пластина; 9-стопорна пластина
Рисунок 3 – Вібраційний грохот з вільно укладеним ситом

Також з метою збільшення імпульсу сили, яка надається частинкам, що забивають отвори сита, була запропонована інша конструкція вібраційно-ударного грохоту [19], яка складається з короба 1 (рис. 4), що спирається на раму 2 через пружні елементи 3 і двох самосинхронізованих вібраторів 4. На бортовинах коробу 1 жорстко закріплені стакани 5 з встановленими пружними елементами 6, на які спирається через тяги 7 підситник 8 з закріпленим ситом 9. На тягах 7 встановлені упори 10, які взаємодіють з стопором 11, закріпленим на внутрішній поверхні бортовин короба 1.

Така конструкція грохоту працює наступним чином.

При роботі вібраторів 4 короб 1 здійснює динамічне стійкі лінійно направлені гармонічні коливання, які передаються сити 9. Через те, що підситник 8 спирається на пружні елементи 6, при русі коробу вгору, завдяки сил інерції сита 9 та матеріалу, що розсипається, пружні елементи 6 стискаються накопичуючи енергію, при русі коробу 1 вниз, сили інерції сита 9 та матеріалу, що розсипається, змінюють напрям на протилежний, тим самим розвантажуючи пружні елементи 6, внаслідок чого накопичена енергія вивільняється спричиняючи прискорене переміщення сита 9 в гору, що призводить до ударної взаємодії упору 10 та стопора 11. Таким чином, забезпечується генерування періодичних ударно-імпульсних коливань.



1-короб; 2-рама; 3-пружні елементи; 4-вібратори; 5-стакан; 6-пружний елемент;
7-тяги; 8-підситник; 9-сито; 10-упори; 11-стопор
Рисунок 4 – Вібраційний грохот з періодичними ударно-імпульсними коливаннями

Забезпечення ударно імпульсного режиму та неоднорідність амплітуд сприяє інтенсивному розрихленню та перемішуванню матеріалу, що

розсипається, це забезпечує посилення сегрегаційних процесів в шарі матеріалу, збільшення швидкості переміщення дрібних фракцій на контакт з

ситом 9. Крім цього, ударна взаємодія упору 10 і стопору 11 призводить до відриву шару матеріалу від сита 9 та надання додаткового імпульсу частинкам, що забивають отвори сита, забезпечуючи його очищення від важко просіваючих фракцій.

Аналіз шляхів підвищення ефективності роботи вібраційних машин в металургійній галузі, а також проведені попередні дослідження [20-22] показують, що грохот з періодичними ударно-імпульсними коливаннями та вільно укладеним ситом значно перевищує аналогічні експлуатаційні показники грохотів, що використовуються в теперішній час, але потребують досліджень з розрахунку їх технологічних, динамічних і міцнісних параметрів.

Висновки

Як показує проведений аналіз існуючі технологічні лінії підготовки металургійної шихти до доменної плавки потребують вібраційних грохотів зі збільшеною ефективністю грохочення, сіячі поверхні котрих мають підвищену динамічну активність та здатні до самоочищення і стабілізації гранулометричного складу обробляемого матеріалу шляхом ударно-імпульсної дії. Розглянуті в роботі технічні рішення щодо створення грохотів з ударно-імпульсними коливаннями та вільно укладеною сіячою поверхнею можуть значно перевищувати технологічні показники діючого обладнання для відсіву некондиційних фракцій металургійної шихти, але потребують додаткових досліджень з розрахунку їх технологічних, динамічних і міцнісних параметрів.

Бібліографічний опис

1. Грохот агломерату // ТОВ «КВМШ плюс»: [Веб-сайт]. URL: <https://kvmsch-plus.all.biz/uk/gurkit-aglomeratu-j-okatyshiv-41-1-sh-g3011037> (дата звернення: 14.10.2021).
2. Грохоты агломерата и окатышей // ООО «Завод промышленного оборудования «Прогресс»»: [Веб-сайт]. URL: <https://zavodgooprogress.com.ua/g9768701-grohoty-dlya-aglomerata> (дата звернення: 14.10.2021).
3. Грохоты // Научно-производственное предприятие «Машпром»: [Веб-сайт]. URL: <https://www.mashprom.com/competitions/metall/mining/grohot/> (дата звернення: 14.10.2021).
4. Sandvik Screens. Sweden: Sandvik mining and construction, 2008. 14 с.
5. Screens // Schenck Process: [Веб-сайт]. URL: <https://www.schenckprocess.com/technologies/screening/screens> (дата звернення: 14.10.2021).
6. Screens and screening equipment // Metso: [Веб-сайт]. URL: <https://www.mogroup.com/products-and-services/plants-and-capital-equipment/screens/> (дата звернення: 14.10.2021).
7. Учитель С. А., Лялюк В. П., Пополов Д. В. Сортировка металлургических шихт на вибрационных грохотах. Саарбрюккен: Palmarium Academic Publishing, 2014. 413 с.
8. Исследование и обоснование параметров высокопроизводительных грохотов с незабивающимися ситами в циклах самоизмельчения: звіт про НДР (заклучн.) / Дніпропетровський металургійний інститут; кер. О. Д. Учитель; викон.: Р. А. Васильєва, Є. О. Зелов, [та ін.]. Шифр теми 065275. № 43221643. Кривий Ріг, 1976. 70 с.
9. Исследование работы грохотов с целью улучшения эффективности отсева и повышения их эксплуатационной надежности. Разработка и исследования новых систем грохотов (заклучн.) / Дніпропетровський металургійний інститут; кер. О. Д. Учитель; викон.: В. Й. Засельський, Я. Ельтушлер, [та ін.]. Шифр теми 082208. № 80021569. Дніпропетровськ, 1981. 68 с.
10. Русских В. П., Тарасов В. П., Криенко О. В. Исследование и совершенствование технологии производства агломерата. Вісник Приазовського державного технічного університету. 2000. № 10. С. 21–25.
11. Бочка В. В., Сова А. В., Двоглазова А. В. Исследование особенностей процесса разрушения агломерата в устройстве барабанного типа. *Металл и литье Украины*. 2018. № 11-12. С. 3–9.
12. Особенности формирования напряженного состояния и разрушения агломерата / В. В. Бочка та ін. *Металл и литье Украины*. 2017. № 6-7. С. 3–6.
13. Поведінка агломерату при механічних навантаженнях / В. В. Бочка та ін. *Актуальні проблеми розвитку металургійної освіти і науки: матеріали Всеукр. науково-технічного конф., м. Дніпро, 4 квіт. 2017 р. Дніпро, 2017. С. 233–237.*
14. Рациональная схема подготовки агломерата к доменной плавке / В. В. Бочка та ін. *Вісник Криворізького національного університету*. 2014. № 36. С. 234–237.
15. Сова А. В. Удосконалення технології виробництва агломерату шляхом формування раціональної блокової структури на основі роздільної підготовки шихти та механічної обробки спеченця : дис. канд. техн. наук: 05.16.02. Дніпро, 2020. 119 с.
16. Хопунов Э. А. Селективное разрушение минерального и техногенного сырья (в обогащении и металлургии). Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2013. 429 с.
17. Учитель А. Д., Засельский В. Й., Пополов Д. В. Анализ формирования гранулометрического состава шихтового материала на тракте его подачи в доменную печь // XIII Международная конференция "Стратегия качества в промышленности и образовании". Варна, 2017. Т. 2. С. 173-176.
18. Вібраційний грохот: пат. 122940 Україна: B07B 1/40, 1/46. № u201710088; заявл. 18.10.2017; опубл. 25.01.2018, Бюл. № 2.
19. Вібраційний грохот: пат. 141145 Україна: B07B1/40, 1/46. № u201908854; заявл. 22.07.2019; опубл. 25.03.2020, Бюл. № 6.
20. Zaslenskiy V. I., Popolov D. V., Zaytsev G. L. Steeply inclined vibrational screen in coal preparation at coke plants. *Coke and chemistry*. 2020. Vol. 63, no. 7. P. 351–355.
21. Засельский В. И., Пополов Д. В. Обоснование использования вибрационно-ударных машин для классификации металлургической шихты. *Потурасвські читання* : тези XIX Всеукр. науково-техн. конф., м. Дніпро, 22 квіт. 2021 р. Дніпро, 2021. С. 47–48.

22. Zasel'skiy V. I., Popolov D. V., Ivanov I. G. Preparation of coking batch in vibrational impact equipment. *Coke and chemistry*. 2021. Vol. 64, no. 4. P. 163–168.

References

- Grokhoto aglomeratu // TOV «KVMSH plyus»»: [Web site]. URL: <https://kvmsch-plus.all.biz/uk/gurkit-aglomeratu-j-okatyshiv-41-1-sh-g3011037> (date of application: 14.10.2021).
- Grokhoto aglomerata i okatyshey // OOO «Zavod promyshlennogo oborudo-vaniya «Progress»»: [Web site]. URL: <https://zavodgooprogress.com.ua/g9768701-grohoty-dlya-aglomerata> (date of application: 14.10.2021).
- Grokhotoy // Nauchno-proizvodstvennoe predpriyatie «Mashprom»: [Web site]. <https://www.mashprom.com/competitions/metall/mining/grohot/> (date of application: 14.10.2021).
- Sandvik Screens. Sweden: Sandvik mining and construction, 2008. 14 c.
- Screens // Schenck Process: [Web site]. URL: <https://www.schenckprocess.com/technologies/screening/screens> (date of application: 14.10.2021).
- Screens and screening equipment // Metso: [Web site]. URL: <https://www.mogroup.com/products-and-services/plants-and-capital-equipment/screens/> (date of application: 14.10.2021).
- Uchitel' S. A., Lyalyuk V. P., Popolov D. V. Sortirovka metallurgicheskikh shikht na vibratsionnykh grokhotakh. Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2014. 413 c.
- Issledovanie i obosnovanie parametrov vysokoproizvoditel'nykh grokho-tov s nezabivayushchimisya sitami v tsiklakh samoizmel'cheniya: zvit pro NDR (zaklyuchn.) / Dnipropetrovs'kiy metalurgiyinyi institut; ker. O. D. Uchitel'; vikon.: R. A. Vasil'eva, E. O. Zelov, [ta in.]. Shifr temi 065275. № 43221643. Kriviy Rig, 1976. 70 s.
- Issledovanie raboty grokhotov s tsel'yu uluchsheniya effektivnosti otseva i povysheniya ikh ekspluatatsionnoy nadezhnosti. Razrabotka i issledovaniya novykh sistem grokhotov (zaklyuchn.) / Dnipropetrovs'kiy metalurgiyinyi in-stitut; ker. O. D. Uchitel'; vikon.: V. Y. Zasel'skiy, Ya. El'tushuler, [ta in.]. Shifr temi 082208. № 80021569. Dnipropetrovs'k, 1981. 68 s.
- Russkikh V. P., Tarasov V. P., Krienko O. V. Issledovanie i sovershenstvo-vanie tekhnologii proizvodstva aglomerata. Visnik Priazovs'kogo derzhav-nogo tekhnichnogo universitetu. 2000. № 10. S. 21–25.
- Bochka V. V., Sova A. V., Dvoeglazova A. V. Issledovanie osobennostey protsessa razrusheniya aglomerata v ustroystve barabannogo tipa. Metall i lit'e Ukrainy. 2018. № 11-12. S. 3–9.
- Osobennosti formirovaniya napryazhennogo sostoyaniya i razrusheniya ag-lomerata / V. V. Bochka ta in. Metall i lit'e Ukrainy. 2017. № 6-7. S. 3–6.
- Povedinka aglomeratu pri mekhanichnikh navantazhennykh / V. V. Bochka ta in. Aktual'ni problemi rozvitku metalurgiynoi osviti i nauki: materialy Vseukr. naukovo-tekhnichnokh konf., m. Dnipro, 4 kvit. 2017 r. Dnipro, 2017. S. 233–237.
- Ratsional'naya skhema podgotovki aglomerata k domennoy plavke / V. V. Bochka ta in. Visnik Krivoriz'kogo natsional'nogo universitetu. 2014. № 36. S. 234–237.
- Sova A. V. Udoskonalennya tekhnologii virobništva aglomeratu shlyakhom formuvannya ratsional'noi blokovoï strukturi na osnovi rozdil'noi pidgo-tovki shikhti ta mekhanichnoi obrobki spechentsya : dis. kand. tekhn. nauk: 05.16.02. Dnipro, 2020. 119 s.
- Khopunov E. A. Selektivnoe razrushenie mineral'nogo i tekhnogennogo syr'ya (v oboga- shchenii i metallurgii). Ekaterinburg: OOO «UIPTs», 2013. 429 s.
- Uchitel' A. D., Zasel'skiy V. Y., Popolov D. V. Analiz formirovaniya granulometricheskogo sostava shikhtovogo materiala na trakte ego podachi v domennuyu pech' // XIII Mezhdunarodnaya konferentsiya "Strategiya kachestva v promyshlennosti i obrazovanii". Varna, 2017. T. 2. S. 173-176.
- Vibratsiinyi hrokhoto: pat. 122940 Ukraina: B07V 1/40, 1/46. № u201710088; zaiavl. 18.10.2017; opubl. 25.01.2018, Biul. № 2.
- Vibratsiinyi hrokhoto: pat. 141145 Ukraina: B07B1/40, 1/46. № u201908854; zaiavl. 22.07.2019; opubl. 25.03.2020, Biul. № 6.
- Zasel'skiy V. I., Popolov D. V., Zaytsev G. L. Steeply inclined vibrational screen in coal preparation at coke plants. *Coke and chemistry*. 2020. Vol. 63, no. 7. P. 351–355.
- Zasel'skiy V. I., Popolov D. V. Obosnovanie ispol'zovaniya vibratsi-onno-udarnykh mashin dlya klassifikatsii metallurgicheskoy shikh-ty. Poturaevs'ki chitannya : tezi KhKh Vseukr. naukovo-tekhn. konf., m. Dnipro, 22 kvit. 2021 r. Dnipro, 2021. S. 47–48.
- Zasel'skiy V. I., Popolov D. V., Ivanov I. G. Preparation of coking batch in vibrational impact equipment. *Coke and chemistry*. 2021. Vol. 64, no. 4. P. 163–168.

УДК 621.774.38

Дейнеко Л.М. Столбовий В.О. Романова Н.С. Кривчик Л.С. Пінчук В.Л. Мачула Н.В.⁶

Формування азотованого шару сталі 5ХЗВЗМфс, отриманого в газоплазмовому двоступеневому вакуумно-дуговому розряді

Анотація

При виробництві труб із корозійностійких сталей на трубопрокатних установках актуальною проблемою є низька стійкість трубного інструменту. Тому, створення високопродуктивних і стійких в експлуатації інструментів зв'язане, у першу чергу, з одержанням й обробкою таких матеріалів, які могли б протистояти жорстким умовам роботи. Мета роботи. Проаналізувати процес формування структури азотованого шару та його властивостей на поверхні штампового інструменту із сталі 5ХЗВЗМФС за технологією газо-плазмового азотування у двоступеневому вакуумно-дуговому розряді для підвищення зносостійкості трубопресового інструменту. Результати. У статті запропоновано, обґрунтовано та розраховано математичну модель розподілу мікротвердості за глибиною дифузійного шару. Наведено аналіз термодинамічної стійкості нітридних дифузійних зон, відповідальних за поліпшення показників зносостійкості інструменту. Наукова новизна. Розроблено математична модель розподілу мікротвердості азотованого шару на основі рівняння Колмогорова-Джонсона-Мела-Аврамі, яка враховує фазові перетворення, пов'язані з процесами реакційної дифузії при азотуванні. Практична значущість. Розроблена математична модель дозволяє кількісно аналізувати кінетику газоплазмового азотування та розраховувати глибину азотованих шарів заданого фазового складу для сталі 5ХЗВЗМФС. Ключові слова: інструментальні сталі, поверхневе зміцнення, кінетика газо-плазмового азотування, математичне моделювання розподілу мікротвердості

Abstract

Formulation of the problem. In the production of pipes from corrosion-resistant steels on tube rolling mills, a relevant problem is the low durability of the pipe tooling. Therefore, the creation of high-performance and durable tools is primarily associated with obtaining and processing materials capable of withstanding harsh working conditions. Purpose. The paper analyzes the structure and properties of the nitrogenated layer formed on the surface of the stamping tool made of 5X3B3MFC steel using the ion-plasma nitriding technology in a two-stage vacuum-arc discharge, aimed at improving the wear resistance of the pipe pressing tool. Findings. The article proposes, substantiates and calculates a mathematical model of the distribution of microhardness according to the depth of the diffusion layer. An analysis of the thermodynamic stability of nitride diffusion zones, which are responsible for improving the wear resistance of the tool, is given. Originality. A mathematical model of the microhardness distribution of the nitrided layer was developed based on the Kolmogorov-Johnson-Mela-Avrami equation, which takes into account phase transformations associated with reaction diffusion processes during nitriding. Practical value. The developed mathematical model makes it possible to quantitatively analyze the kinetics of gas plasma nitriding and calculate the depth of nitrided layers of a given phase composition for 5X3B3MFC steel.

Keywords: tool steels, surface hardening, kinetics of gas-plasma nitriding, mathematical modeling of microhardness distribution

Вступ

Поверхневе зміцнення інструментальних сталей за допомогою технології газо-плазмового азотування досить широко застосовується в промисловості, проте найближче десятиліття пов'язують з його подальшим інтенсивним розширенням і впровадженням. Це пов'язано з високим ступенем технологічності цього процесу, його керованістю, з високими показниками екологічності, з більш високими фізико-механічними властивостями покриття в порівнянні з іншими методами і технологіями поверхневого зміцнення.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В сучасному виробництві гарячепресованих труб матричні кільця та голки-оправки

Таблиця 1 – Стійкість пресового інструмента [3]

трубопрофільного преса зазнають інтенсивного зношування. Досить сказати, що до 90% інструменту, що використовується в процесі деформування, виходить з ладу в результаті зносу і тільки 10 ÷ 15% з інших причин [1,2]. В таблиці №1 наведено оцінку стійкості інструменту, що безпосередньо контактує з металом при пресуванні труб з корозійностійких і високолегованих сталей [3]. Як видно з таблиці, зносостійкість досить низька. У зв'язку з цим, дослідження закономірностей структуроутворення при газоплазмовому насиченні поверхні трубопресового інструменту азотом з метою підвищення зносостійкості штампових сталей є науково-практичним завданням трубного виробництва.

Інструмент	Стійкість інструменту при виробництві труб із		
	вуглецевих сталей	корозійностійких сталей	сплавів і високолегованих сталей
Матричні кільця і вставки	300 – 500	До 5-7	До 5
Трубні оправки (голки)	300 – 500	50 – 80	20 – 50

З урахуванням умов експлуатації трубопресового інструменту, до матеріалу ставляться такі вимоги, як висока теплостійкість, в'язкість, висока розгаростійкість, зносостійкість, жаростійкість, висока теплопровідність. Зносостійкість загартованих інструментальних сталей сильно залежить від твердості структурних складових, кількості карбідів, їх форми, розмірів, розподілу, твердості і величини зерна. З підвищенням твердості і кількості карбідів підвищується міцність, але при цьому знижується в'язкість і втомна міцність [4]. Комплекс перерахованих властивостей, який повинен мати пресовий інструмент, досягається застосуванням при його виготовленні з жароміцних сталей мартенситного класу, легованих хромом, вольфрамом, нікелем, молібденом [5]. На теперішній час для виготовлення голок-оправок трубопрофільних пресів і матричних кілець збірних матриць найчастіше використовують вториннотвердіючі сталі 4X5MФ1С і 5X3В3МФС (ДИ-23) (ДСТУ 3953-2000), AISI 4140 (USA) і AISI H11 (USA). Ці сталі піддаються термопокращенню з подвійним відпуском на розпад залишкового аустеніту та вторинне твердіння. Для подальшого підвищення ресурсу зносостійкості трубопресового інструменту доцільно застосовувати комбіновану термічну обробку, яка після гартування з подвійним відпуском передбачає азотування поверхні в газоплазмовому двоступеневому вакуумно-дуговому розряді (ДВДР).

В протилежність азотуванню в тліючому розряді, газоплазмове азотування в двоступеневому вакуумно-дуговому розряді дозволяє проводити азотування при негативному або позитивному потенціалі, доданому до зразка. Ключова роль тут, мабуть, належить робочому газу азоту, який знаходиться в збудженому стані. Основними компонентами газоплазмового вакуумно-дугового

розряду є іони молекулярного азоту N_2^+ , нейтральні атоми азоту N та порушені молекули азоту в різних метастабільних станах. [6,7,8,9]. Іони молекулярного азоту N_2^+ мають значну кінетичну енергію в результаті прискорення в електричному полі розрядного проміжку і беруть участь в нагріванні підкладки та розпиленні її поверхні, збільшуючи шорсткість [10,7,8,11,12]. Головною перевагою азотування при позитивному потенціалі на підложці є збереження вихідної чистоти її поверхні (оскільки електрони не розпилюють поверхню), в той час як при негативному потенціалі шорсткість поверхні істотно збільшується через її розпилення іонним бомбардуванням. Тому після іонного азотування потрібна додаткова механічна обробка робочих поверхонь інструменту і деталей машин. Відмінною рисою мікроструктури азотованого шару після газоплазмового азотування є наявність дрібнодисперсної дуже міцної ϵ -фази. Завдяки наявності в шарі цієї фази поверхнева твердість деталей, що азотуються, вище, ніж при газовому азотуванні майже на HV 200 [14]. Завдяки цьому, можливо отримання дифузійного шару з розвинутою нитридною зоною, що надає високу зносостійкість виробам і антикорозійні властивості.

Метою даної роботи є дослідження структури та властивостей сталі 5X3В3МФС після комбінованої термічної обробки, яка складається із загартування з подвійним відпуском з подальшим азотуванням поверхні в газоплазмовому ДВДР.

Матеріали та методика досліджень

Хімічний склад досліджених зразків напівтеплостійкої, вторинно твердіючої сталі 5X3В3МФС отриманий на основі оптико-емісійного спектрального аналізу і представлений в таблиці 2

Таблиця 2. Хімічний склад сталі 5X3В3МФС, % по масі

C	Si	W	Mn	Cr	V	Mo	Ni	Cu	S	P
							Не более			
0,45-0,55	0,8-1,1	2,8-3,3	0,15-0,45	2,5-3,5	0,3-0,5	1,2-1,5	0,35	0,30	0,03	0,03

Зразки з мартенситно-старіючої сталі 5X3В3МФС піддавалися комбінованій термічній обробці - об'ємному загартуванню в масло з подвійним відпуском для розпаду аустеніту залишкового і на вторинну твердість (режим представлений на рис.1) та азотуванню при температурі 540-570°C у газоплазмовому двоступеневому вакуумно-дуговому розряді. Іонне азотування проводилося на установці «Булат 6» (ННЦ ХФТІ, м. Харків). Ця установка містить вакуумну камеру з розташованими в ній катодами, джерелами живлення та тримачем зразків (виробів). Зразки витримувалися серед іонізованих і активованих атомів азоту при тиску 0,6 Па і при подачі на тримач зразків негативної напруги 1000-1300 В протягом 1 години.

Зазначені параметри азотування дозволяють розігріти поверхню зразків сталі 5X3В3МФС до

температури 540°C і отримати азотований шар товщиною до 60...70 мкм. Високий ступінь іонізації плазми дозволяє проводити безпосередньо перед азотуванням очищення та активацію поверхні зразків. Очищення полягає у видаленні окисних плівок та розпиленні атомів з поверхні зразків активними частинками газоплазмового середовища. Очищення забезпечує наступний високий рівень адгезії активного азоту на поверхні зразків у режимі насичення. [15]

Після азотування проводився рентгенофазовий та металографічний аналіз азотованого шару зразків, а також було побудовано графік розподілу мікротвердості азотованого шару за його глибиною. Металографічний аналіз виробів і зразків виконаний з використанням мікроскопів Axiovert 200 MAT і растрового електронного мікроскопу РЕМ.

Мікротвердість дифузійних шарів вимірювали на мікротвердомірі ПМТ-3М на металографічних шліфах при навантаженні 10Н.

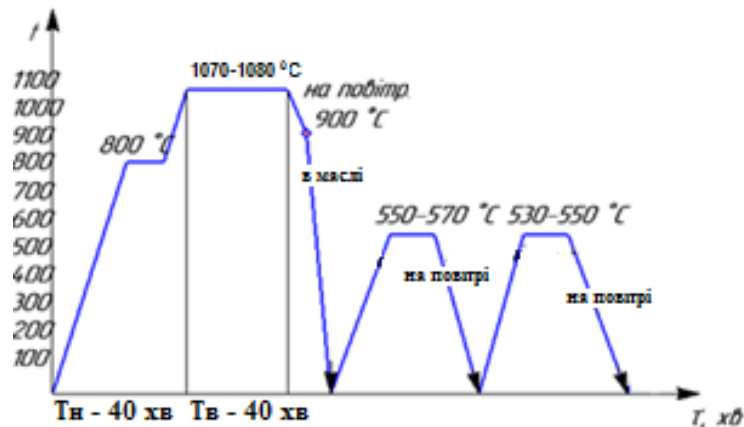


Рис.1- Режим об'ємної термічної обробки сталі 5Х3В3МФС перед газоплазмовим азотуванням

Результати дослідження та їх обговорення

Основою мікроструктури загартованої і відпущеної сталі є відпущений мартенсит – легований α-твердий розчин, пересичений по вуглецю і легуючими елементами, а також в структурі розташовуються включення спеціальних карбідів, які не

розчинилися в аустениті при нагріванні під загартування. На рис.2 та 3 представлена мікроструктура зразків сталі 5Х23В3С після об'ємного загартування з подвійним відпуском у відповідності з рис.1 і з наступним газоплазмовим азотуванням в ДВДР.

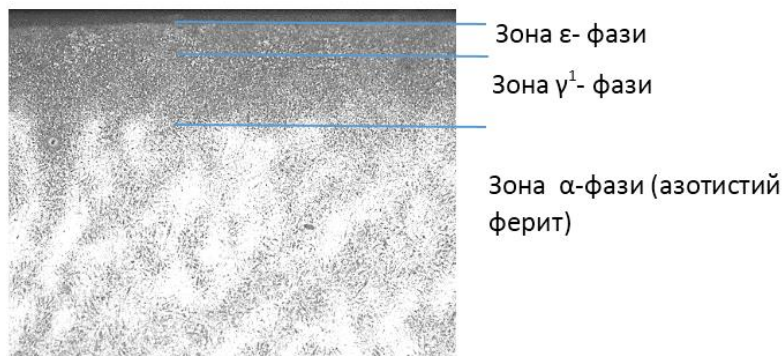


Рис.2 Мікроструктура сталі 5Х3В3МФС після об'ємного загартування з подвійним відпуском у і з наступним газоплазмовим азотуванням в ДВДР, x200, Axiovert 200 MAT

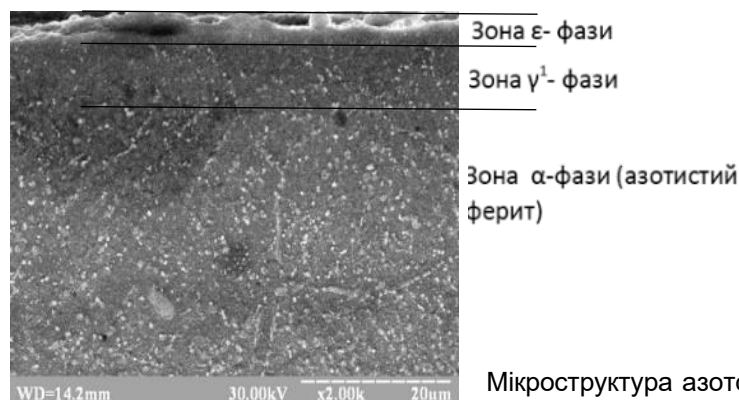


Рис.3 сталі 5Х3В3МФС

Мікроструктура азотованого шару зразка (РЕМ)

При застосуванні технології азотування в газовій плазмі дугового розряду отримана структура, що складається, згідно з даними рентгенофазового

аналізу, з шару нітридів Fe₂₋₃N (ε-фаза) та Fe₄N (γ¹-фаза) – нітридна зона, та мартенситу відпуску, насиченого азотом (α-фаза або азотистий ферит) –

дифузійна зона або зона внутрішнього азотування, карбідів та нітридів легуючих елементів. Виділення частинок нітридів хрому, молібдену і ванадію при азотуванні дозволяє додатково підвищити поверхневу твердість. Таким чином, зона внутрішнього азотування - це багатофазна область, яка складається з α -фази, карбідів і нітридів легуючих елементів. Слід зазначити, що параметри технології азотування в плазмі ДВДР сильно впливають на всі процеси, пов'язані з формуванням азотованого шару, а саме, на активацію газового середовища, на адсорбцію азоту на поверхню зразка і на його дифузію вглиб сплаву.

Таблиця №3 Експериментальні дані результатів вимірювання мікротвердості азотованого шару зразка сталі 5Х3В3МФС

Глибина азотованого шару, мкм	10	10	10	20	20	30	30	40	40	50	50	60	70	80	150	150	250	250	350	350
Мікротвердість, $\times 10^4$ МПа	1,05	1,045	1,04	1,03	1,035	1,025	1,026	0,896	0,867	0,76	0,77	0,74	0,625	0,62	0,59	0,57	0,56	0,54	0,535	0,53

При дослідженні процесів азотування, насамперед аналізується розподіл концентрації азоту або розподіл значень мікротвердості по глибині дифузійного шару. Твердість азотованого шару визначає зносостійкість інструменту, його опір корозії та, загалом, є універсальним критерієм ефективності процесу азотування. Як свідчать результати заміру мікротвердості експериментальних зразків, товщина азотованого шару склала 65...70 мкм. По даним металографічного та рентгеноструктурного

Основним процесом, що модифікує властивості поверхні інструментальної сталі при газоплазмовому азотуванні, є власне реакційна (стара назва реактивна) дифузія, у процесі якої в ізотермічних умовах насичення змінюється структурно-фазовий склад поверхні [16]. Графік зміни мікротвердості азотованого шару сталі 5Х3В3МФС, представлений на рисунку 4, відображає характер і ступінь зміни структурно-фазового складу по глибині від поверхні зразка після газоплазмового азотування у ДВДР. Графік побудований на основі експериментальних даних, представлених у таблиці №3

аналізів, твердість на поверхні сягає 10000-10500 МПа з причини утворення нітридних зон з $\text{Fe}_2\text{-3N}$ (ϵ -фаза) і Fe_4N (γ' -фаза) і дифузійної зони (підшару) азотистого фериту (α -фаза), в якому присутні карбіді і нітриди легуючих елементів хрому, молібдену, ванадію. В силу того, що α -фаза насичена азотом, вона має підвищену корозійну стійкість і твердість по відношенню до мартенситу відпуску серцевини деталі.

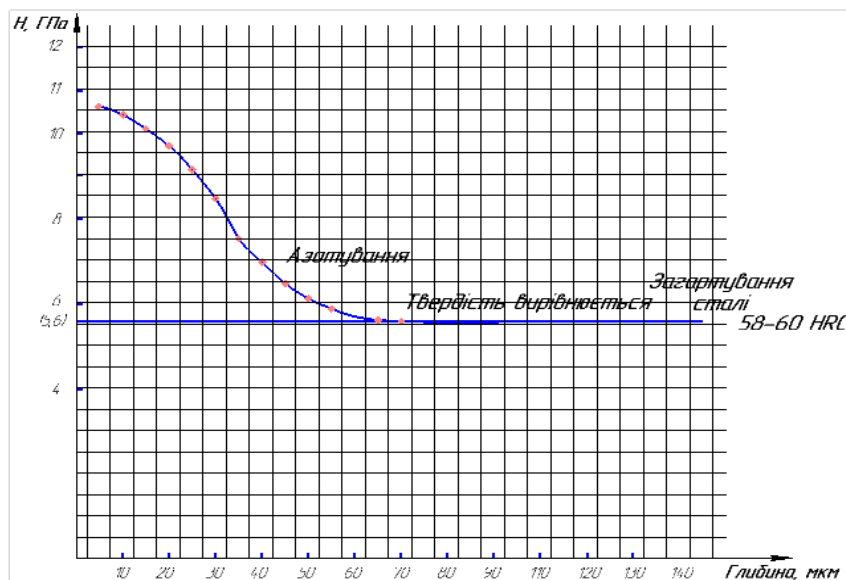


Рис. 4 Розподіл значень мікротвердості по глибині азотованого шару інструментальної сталі 5Х3В3МФС після газоплазмового азотування

На рисунку 5 наведена фазова діаграма стану Fe-N та схема дифузійного насичення поверхні азотом, яка дозволяє зрозуміти структурно-фазові перетворення в поверхні інструментальних сталей в процесі азотування.

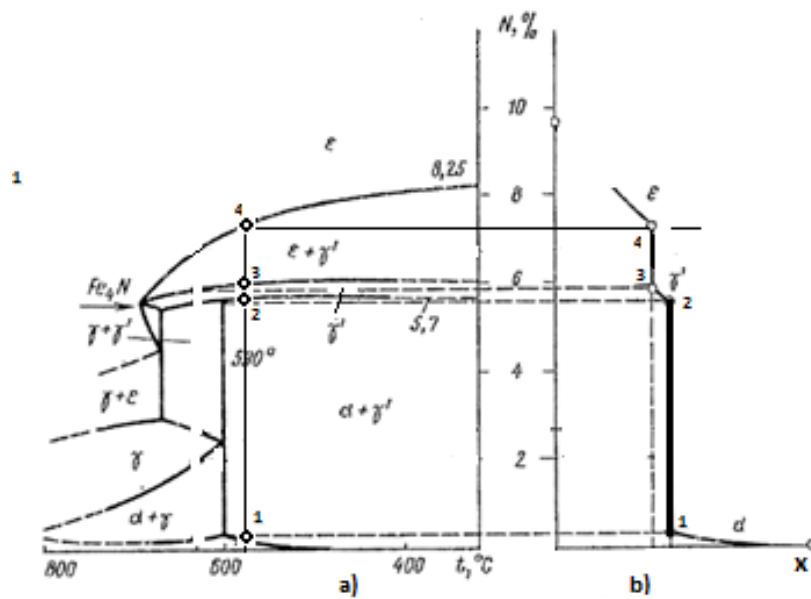


Рис.5 - Схема дифузійного насичення азотом поверхні заліза:
 а) діаграма фазової рівноваги Fe-N;
 б) крива розподілу концентрації азоту по глибині зони азотування при температурі 560-580°C

На кривій розподілу концентрації азоту можна виділити області так званої атомної дифузії (насичення азотом однофазних областей) та області реакційної дифузії (зони, де дифузія супроводжується фазовими перетвореннями). Як показано на рис. 5 (б), до ділянок з атомною дифузією відносяться лінії концентраційного розподілу азоту d-1, 2-γ' і 4-ε, а до ділянок з реакційною дифузією

відносяться вертикальні прямі концентраційного розподілу 1-2 і 3-4. Кінетика атомної дифузії описується другим законом Фіка. У разі поверхневого насичення сталі азотом, другий закон Фіка може бути представлений в одновимірному вигляді, оскільки дифузія йде тільки в перпендикулярному до поверхні напрямку:

$$\frac{\partial C(x, \tau)}{\partial \tau} = D \cdot \frac{\partial^2 C(x, \tau)}{\partial x^2} \tag{1}$$

Аналітичне рішення цього рівняння для напів-нескінченного тіла (таке припущення для процесів хіміко-термічної обробки виправдане через велику

різницю між товщиною азотованого шару і товщиною зразка) може бути представлено у вигляді: [16,17]

$$C_\alpha(x, \tau) = a_\alpha + b_\alpha \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_\alpha\tau}}\right); \tag{2}$$

$$C_{\gamma'}(x, \tau) = a_{\gamma'} + b_{\gamma'} \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_{\gamma'}\tau}}\right); \tag{3}$$

$$C_\epsilon(x, \tau) = a_\epsilon + b_\epsilon \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_\epsilon\tau}}\right) \tag{4}$$

де $C_\alpha(x, \tau)$, $C_{\gamma'}(x, \tau)$, $C_\epsilon(x, \tau)$ – функції розподілу концентрації азоту в α , γ' і ϵ – фазах відповідно в залежності від координат x і часу τ ;

a_α , $a_{\gamma'}$, a_ϵ , b_α , $b_{\gamma'}$, b_ϵ – константи, що залежать від початкових і граничних умов;

D_α , $D_{\gamma'}$, D_ϵ - коефіцієнти дифузії азоту в α , γ' і ϵ – фазах відповідно;

$\operatorname{erf}()$ – функція помилок, що визначається виразом

$$\operatorname{erf}(\vartheta) = \frac{2}{\pi} \int_0^\vartheta e^{-\vartheta^2} d\vartheta \tag{5}$$

При граничних умовах $C_{\text{пов}}(\tau) = C(0, \tau) = \text{const}$, тобто коли концентрація азоту на поверхні напів-безкінцевого тіла постійна, розподіл концентрації азоту в однофазній області α -фази азотованого

шару аналітично буде визначатися наступним виразом [17]:

$$C(x, \tau) = C_1 + (C_n - C_1) \cdot \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D\tau}}\right)\right) \tag{6}$$

де C_1 – початкова концентрація азоту в сталі, тобто $C(x, 0) = C_1$, практично для сталі 5Х3ВЗМФС, $C_1 = 0$. C_n – визначатися буде азотним потенціалом газоплазмового середовища.

можуть бути описані рівнянням Колмогорова-Джонсона-Мела-Аврамі, відоме в англійських публікаціях, як JMAK – рівняння. Це рівняння описує кінетику фазових перетворень в ізотермічних умовах (процес азотування також відбувається в ізотермічних умовах) [18]:

Ділянки концентраційного розподілу азоту, пов'язані з фазовими перетвореннями при дифузійному насиченні (реакційна дифузія), аналітично

$$\alpha(\tau) = 1 - \exp [(-k\tau)^n] \tag{7}$$

де $\alpha(\tau)$ – міра фазового перетворення (доля нової фази в результаті фазового перетворення); τ – час; k – константа швидкості фазового перетворення; n – кінетичний показник, який відбиває геометрію зародків фази, яка зростає.

Слід зазначити, що розподіл мікротвердості азотованого шару якісно відповідає не тільки розподілу вмісту азоту, але також знаходиться у прямій залежності від фазового складу (чим більша частка нітридних фаз та азотистого фериту в шарі, тим вище буде його мікротвердість). Виходячи з цього, доцільно розглянути математичну модель розподілу мікротвердості за глибиною азотованого шару, побудовану на основі кінетичного рівняння фазового перетворення Колмогорова-Джонсона-Мела-Аврамі (7).

Зважаючи на добре відоме і в теорії дифузії, і в практиці хіміко-термічної обробки параболічне співвідношення між товщиною дифузійного шару

та часом його насичення $\delta = K \cdot \sqrt{\tau}$, де δ – товщина дифузійного шару, τ – час насичення, K – константа параболічного росту [16], можна від кінетичного рівняння (7) перейти до моделі розподілу мікротвердості за глибиною азотованого шару у вигляді:

$$HV(\delta) = A - B \cdot \exp[-C\delta^N] \quad (8)$$

де A , B , C і N – параметри моделі, які необхідно підібрати, виходячи з експериментальних даних по заміру мікротвердості на основі методу найменших квадратів. Ця задача була виконана в математичному процесорі MathCad 2001 Professional. В результаті була отримана наступна аналітична залежність:

$$HV(\delta) = 6000 + 4600 \exp(-0,88 \cdot 10^{-5} \delta^3) \quad (9)$$

На рис.6 показаний результат моделювання розподілу мікротвердості по глибині азотованого шару для сталі 5Х3В3МФС.

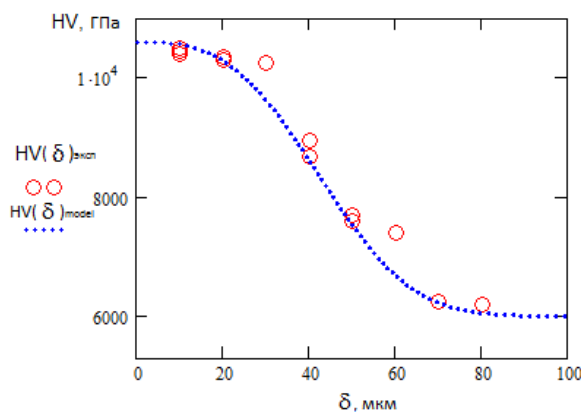


Рис.6 – Експериментальні ($\circ\circ$) і змодельовані (\dots) значення мікротвердості в залежності від глибини азотованого шару сталі 5Х3В3МФС

При дифузійному насиченні поверхні активними атомами азоту через певний часовий інтервал концентрація азоту на поверхні сплаву досягне межі його розчинності в α , що призведе до виділення перших кристалів γ' -фази, а потім і ϵ -фази при граничному насиченні азотом вже γ' -фази відповідно. Як впливає з металографічного аналізу і як схематично відображено на рис.7, зародження γ' -фази на початкових стадіях відбувається на поверхні головним чином, по межах зерен α -фази. Цей процес зародження нової фази і її зростання буде йти в часі, доки на поверхні не сформується монолітний шар γ' -фази, потім і ϵ -фази. Причому концентрація азоту в α і γ' -фазах безпосередньої близькості до міжфазної межі розділу α/γ' визначатимуться точками термодинамічної рівноваги 1 та 2 діаграми стану при температурі азотування (див. рис.5). Еволюція описаного фазового перетворення у процесі насичення поверхні азотом схематично представлена на рисунку 7 (аналогічна схема наведена у роботі [19]):

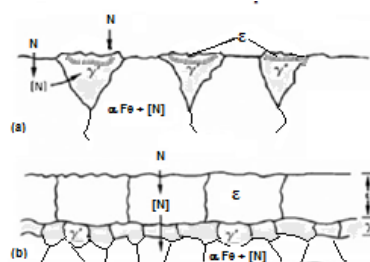


Рис. 7 - Схема формування азотованого шару

Як впливає з рентгеноструктурного та металографічного аналізів сталі 5Х3В3МФС, результатом реакційної дифузії є формування двох дифузійних фронтів ϵ/γ' і γ'/α , що розділяють нітридні зони та зону внутрішнього азотування. Можна виділити ще один дифузійний фронт, що формує зону нітридів легуючих елементів Cr, W, Mo. Цей дифузійний фронт додатково підвищує міцність та твердість азотованого шару, але менш чітко виражений структурно через малу об'ємну частку цих нітридів та високий ступінь їх дисперсності. Схематично основні два фронти ϵ/γ' і γ'/α показано на рис. 7(б) і 8.

Товщина кожної з дифузійних зон залежить від швидкості просування цих фронтів. Відповідно до теорії хіміко-термічної обробки, швидкість просування дифузійного фронту γ'/α або ϵ/γ' при насиченні поверхні азотом визначається виходячи з рівнянь балансу мас [17]:

$$\frac{d\lambda_{\gamma'/\alpha}}{d\tau} = \frac{D_N^{\gamma'} \frac{\partial C_{\partial}}{\partial x} - D_N^{\alpha} \frac{\partial C_{\partial}}{\partial x}}{C_N^{\gamma'/\alpha} - C_N^{\alpha/\gamma'}} \quad (10)$$

$$\frac{d\lambda_{\epsilon/\gamma'}}{d\tau} = \frac{D_{\epsilon} \frac{\partial C_{\epsilon}}{\partial x} - D_{\gamma'} \frac{\partial C_{\gamma'}}{\partial x}}{C_{\epsilon/\gamma'} - C_N^{\gamma'/\epsilon}} \quad (11)$$

де $(d\lambda(\gamma'/\alpha))/d\tau$, $(d\lambda(\epsilon/\gamma'))/d\tau$ - швидкість переміщення дифузійного фронту γ'/α і ϵ/γ' відповідно;

$\partial C(\gamma')/\partial x$ і $(\partial C_{\alpha})/\partial x$ - концентраційні градієнти по азоту в γ' -фазі і в α -фазі поблизу дифузійного фронту γ'/α ;

$\partial C_{\epsilon}/\partial x$ і $\partial C_{\gamma'}/\partial x$ - концентраційні градієнти по азоту в ϵ -фазі і в γ' -фазі поблизу дифузійного фронту ϵ/γ' ;

$C(\gamma'/\alpha)$, $C(\alpha/\gamma')$ - концентрація азоту поблизу дифузійного фронту γ'/α зі сторони γ' -фазі і α -фазі відповідно, ці концентрації визначаються по діаграмі фазової рівноваги при температурі азотування точками 1 і 2 відповідно (див.рис.5 а);

$C(\epsilon/\gamma')$ і $C(\gamma'/\epsilon)$ - концентрація азоту поблизу дифузійного фронту ϵ/γ' зі сторони ϵ -фазі і γ' -фазі відповідно, ці концентрації визначаються по діаграмі фазової рівноваги при температурі азотування точками 3 і 4 відповідно (див.рис.5 а).

Співвідношення розмірів нітридних зон та зони внутрішнього азотування визначає зрештою профіль мікротвердості азотованого шару. При формуванні трифазного азотованого шару (рис.7 б), локальна рівноважна концентрація γ' -фазі на кордоні з α -фазою та ϵ -фазою визначаються, відповідно до діаграми фазової рівноваги, точками 2 і 3 відповідно (див. рис.5). При цьому в шарі γ' -фазі неминуче виникне градієнт концентрації азоту, що призводитиме до зміщення фронту γ'/α в бік α -

фазі, а фронту ϵ/γ' в бік ϵ -фазі і в кінцевому підсумку до розчинення шару ϵ -фазі при тривалих витримках з підвищеною температурою (див.рис.8). Швидкість переміщення фронтів γ'/α та ϵ/γ' залежить як від коефіцієнтів дифузії D_{α} , $D_{\gamma'}$, D_{ϵ} , так і від концентраційних градієнтів. Подібного роду еволюція трифазного, термодинамічно нестабільного азотованого шару, що призводить до розчинення ϵ -фазі під час відпалу експериментально підтверджена в роботі [20]

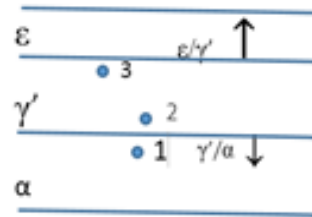


Рис.8 - Схема переміщення дифузійних фронтів термодинамічно нерівноважного трифазного азотованого шару після завершення процесу азотування

Висновки

У роботі проведено аналіз структури та властивостей азотованого шару сталі 5Х3В3МФС після газо-плазмового азотування у двоступеневому вакуумно-дуговому розряді. Запропоновано, обґрунтовано та розраховано для сталі 5Х3В3МФС математичну модель для побудови профілю мікротвердості азотованого шару. Модель розроблена на основі рівняння Колмогорова-Джонсона-Мела-Аврами і враховує кінетику фазових перетворень, які супроводжують процеси реакційної дифузії при азотуванні сталі.

Бібліографічний список

1. Боброва Т.Б., Високос С.М., Глушко Ю.Ю., Пеховка М.В. та інші Матеріалознавство: навчальний посібник. Київ: Ресурсний центр «Гурт». 2019. 167 с.
2. Кривчик Л.С., Хохлова Т.С., Дейнеко Л.М., Пінчук В.Л., Сребрянський Г.О. Зміцнення трубопресового інструменту для виробництва корозійностійких труб шляхом нанесення покриття зносостійких аморфних сплавів» XIII International Scientific and Practical Conference «Multidisciplinary academic research, innovation and results», Prague, Czech Republic. 05-08 April 2022, С. 736-748
3. Дрюян В. М., Гуляев Ю.Г., Чукмасов С.О. Теорія та технологія трубного виробництва: підручник. Дніпро: VAL, 2000. 587 с.
4. Василенко І. І., Широков В.В., Василенко Ю.І. Конструкційні та електротехнічні матеріали : навч. посіб. Львів : Магнолія, 2006, 2009. 242 с.
5. Гогаєв К.О., Сидорчук О.М., Радченко О.К. Інструментальні штампові сталі для гарячого деформування. Металловедение и термическая обработка металлов. 1995. №8. С. 18-20.
6. Kryvchuk L., Pinchuk V.L., Khokhlova T.S., Ivanov I.V., Mohylenets M.V., Dumenko K.A., Article title. Journal of Engineering Sciences. THE CARBONITRATION OF THE TOOL FOR THE STAINLESS STEEL PIPES PRESSING. 2020. Vol.7(1). P. 1–5, doi:10.21272/jes.2020.7(1).e1.
7. Кривчик Л.С., Пінчук В.Л., Подгібалов О., Юрков М. Методи зміцнення трубопресового інструменту // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції для творчої молоді України Маріуполь, 26 квітня 2020 р.
8. Кривчик Л.С., Хохлова Т.С., Пінчук В.Л. Шляхи термозміцнення трубопресового інструменту для виробництва неіржавіючих труб // Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції

- студентів і молодих вчених “Молода академія 2020” (м. Дніпро, 21-22 травня 2020 р.). – Т. 1. – Дніпро, НМетАУ, 2020.
9. Кривчик Л.С., Пінчук В.Л., Хохлова Т.С. Вибір зміцнюючої технології трубопресового інструмента для виробництва нержавіючих труб // VIII Міжнародна науково-практична конференція «Modern problems in science», Прага, Чехія, 9-12 листопада 2020 р., С. 699-707
 10. Саблев Л.П., Ломино Н.С., Ступак Р.И., Андреев А.А., Чикрыжов А.А. Двухступенчатый вакуумно-дуговой разряд: характеристики и методы создания. Сб. докл. 6-й Межд. конф. «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов». Харьков, 2005, ч. 2, С. 159 – 169.
 11. Кривчик Л.С. Зміцнення трубопресового інструменту для виробництва корозійностійких труб шляхом нанесення зносостійких покриттів // Конференція «Інформаційні технології в галузі», м. Кривий Ріг, 17.03.2022 р., ВСП «КТФК УДУНТ».
 12. Кривчик Л.С., Хохлова Т.С. Використання хіміко-термічної обробки з метою покращення експлуатаційних властивостей інструмента для пресування нержавіючих труб // XI Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Сучасний рух науки» м. Дніпро. 8-9 жовтня 2020 р., С. 347-353
 13. Могильная Е.П., Дубасов В.М. «Ионное азотирование изделий из конструкционной стали 38ХМФА», СНУ ім. Володимира Даля, м. Луганськ, Україна
 14. Могильная Е.П., Дубасов В.М. «Ионное азотирование изделий из конструкционной стали 38ХМФА», СНУ ім. Володимира Даля, м. Луганськ, Україна, С. 193-198.
 15. Ralph B., The processing of metal matrix composites — an overview/B. Ralph, H.C. Yuen and W.B. Lee. Journal of Materials Processing Technology. – 1997. vol. 63. №1-3. P. 339 – 353.
 16. Лобанов М. Л. Зорина М.Л. Методы определения коэффициентов диффузии, Учебное пособие, Екатеринбург, 2017
 17. Modeling and Simulation of Thermochemical Heat Treatment Processes: A Phase Field Calculation of Nitriding in Steel, von Yakub Adesoga Tijani, Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften – Dr. Ing. – Vorgelegt im Fachbereich 3 (Mathematik & Informatik) der Universität at Bremen im Juni 2008
 18. Yu. V. Yudina, A. A. Kuklinaa, P. D. Lebedevb, and M. V. Maisuradzea, * Yeltsin Ural Federal University, Yekaterinburg, Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics, Ural Branch
 19. M A J Somers IFHTSE Global 21: heat treatment and surface engineering in the twenty-first century Part 14 – Development of compound layer during nitriding and nitrocarburising; current understanding and future challenges, ISSN: 1749-5148 (Print) 1749-5156 (Online)
 20. T. LIAPINA, A. LEINEWEBER, and E.J. MITTEMEIJER Phase Transformations in Iron-Nitride Compound Layers upon Low-Temperature Annealing: Diffusion Kinetics of Nitrogen in γ - and δ -Iron Nitrides, Article in Metallurgical and Materials Transactions A · January 2006, DOI: 10.1007/s11661-006-0003-4

References

1. Bobrova T.B., Vysokos S.M., Hlushko Yu.Iu., Pekhovka M.V. та інші Materialoznavstvo: navchalnyi posibnyk. Kyiv: Resursnyi tsentr «Hurt». 2019. 167 s.
2. Kryvchuk L.S., Khokhlova T.S., Deineko L.M., Pinchuk V.L., Srebrianskyi H.O. Zmitsnennia trubopresovoho instrumentu dlia vyrobnytstva koroziiostiikykh trub shliakhom nanesennia pokryt znosostiikykh amorfnykh splaviv» XIII International Scientific and Practical Conference «Multidisciplinary academic research, innovation and results», Prague, Czech Republic. 05-08 April 2022, s. 736-748
3. Druian V. M., Hulciaiev Yu.H., Chukmasov S.O. Teoriia ta tekhnolohiia trubnoho vyrobnytstva: pidruchnyk. Dnipro: VAL, 2000. 587 s.
4. Vasylenko I. I., Shyrokov V.V., Vasylenko Yu.I. Konstruktsiini ta elektrotekhnichni materialy : navch. posib. Lviv : Mahnoliia, 2006, 2009. 242 s.
5. Hohaiev K.O., Sydorhuk O.M., Radchenko O.K. Instrumentalni shtampovi stali dlia hariachoho deformuvannia. Metallovedenye y termicheskaia obrabotka metallov. 1995. №8. S. 18-20.
6. Kryvchuk L., Pinchuk V.L., Khokhlova T.S., Ivanov I.V., Mohylenets M.V., Dumenko K.A., Article title. Journal of Engineering Sciences. THE CARBONITRATION OF THE TOOL FOR THE STAINLESS STEEL PIPES PRESSING. 2020. Vol.7(1). P. 1–5, doi:10.21272/jes.2020.7(1).e1.
7. Kryvchuk L.S., Pinchuk V.L., Podhibalov O., Yurkov M. Metody zmitsnennia trubopresovoho instrumentu // Materialy Vseukrainskoi naukovopraktychnoi konferentsii dlia tvorchoi molodi Ukrainy Mariupol, 26 kvitnia 2020 r.
8. Kryvchuk L.S., Pinchuk V.L., Podhibalov O., Yurkov M. Metody zmitsnennia trubopresovoho instrumentu // Materialy Vseukrainskoi naukovopraktychnoi konferentsii dlia tvorchoi molodi Ukrainy Mariupol, 26 kvitnia 2020 r

9. Kryvchuk L.S., Pinchuk V.L., Khokhlova T.S. Vybir zmitsniuiuchoi tekhnolohii trubopresovoho instrumenta dlia vyrobnytstva nerzhaviiuchykh trub // VIII Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia «Modern problems in science», Praha, Chekhiiia, 9-12 lystopada 2020 r., S. 699-707
10. Sablev L.P., Lomyno N.S., Stupak R.Y., Andreev A.A., Chyrgyzhov A.A. Dvukhstupenchatyi vakuumno-duhovoii razriad: kharakterystyky y metody sozdanyia. Sb. dokl. 6-y Mezhd. konf. «Oborudovanye y tekhnolohyy termycheskoi obrabotky metallov y splavov». Kharkov, 2005, ch. 2, S. 159 – 169.
11. Kryvchuk L.S. Zmitsnennia trubopresovoho instrumentu dlia vyrobnytstva koroziiostiikykh trub shliakhom nanesennia znosostiikykh pokryttiv // Konferentsiia «Informatsiini tekhnolohii v haluzi», m. Kryvyi Rih, 17.03.2022 r., VSP «KTFK UDUNT».
12. Kryvchuk L.S., Khokhlova T.S. Vykorystannia khimiko-termichnoi obrobky z metoiu pokrashchennia ekspluatatsiinykh vlastyvostei instrumenta dlia presuvannia nerzhaviiuchykh trub // Khl Mizhnarodna naukovo-praktychna internet-konferentsiia «Suchasnyi rukh nauky» m. Dnipro. 8-9 zhovtnia 2020 r., S. 347-353
13. Mohylnaia E.P., Dubasov V.M. «Yonnoe azotyrovanye yzdeliy yz konstruktsyonnoi staly 38KhMFA», SNU im. Volodymyra Dalia, m. Luhansk, Ukraina, S.
14. Могильная Е.П., Дубасов В.М. «Ионное азотирование изделий из конструкционной стали 38ХМФА», СЧУ им. Володимира Даля, м. Луганськ, Україна, С. 193-198.
15. Ralph B., The processing of metal matrix composites — an overview/B. Ralph, H.C. Yuen and W.B. Lee. Journal of Materials Processing Technology. – 1997. vol. 63. №1-3. P. 339 – 353.
16. Lobanov M. L. Zoryna M.L. Metody opredeleniia koefytsyentov dyffuzyu, Uchebnoe posobyе, Ekaterynburh, 2017
17. Modeling and Simulation of Thermochemical Heat Treatment Processes: A Phase Field Calculation of Nitriding in Steel, von Yakub Adesoga Tijani, Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften – Dr. Ing. – Vorgelegt im Fachbereich 3 (Mathematik & Informatik) der Universit at Bremen im Juni 2008
18. Yu. V. Yudina, A. A. Kuklinaa, P. D. Lebedevb, and M. V. Maisuradzea, * Yeltsin Ural Federal University, Yekaterinburg, Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics, Ural Branch
19. M A J Somers IFHTSE Global 21: heat treatment and surface engineering in the twenty-first century Part 14 – Development of compound layer during nitriding and nitrocarburising; current understanding and future challenges, ISSN: 1749-5148 (Print) 1749-5156 (Online)
20. T. LIAPINA, A. LEINEWEBER, and E.J. MITTEMEIJER Phase Transformations in Iron-Nitride Compound Layers upon Low-Temperature Annealing: Diffusion Kinetics of Nitrogen in γ - and δ -Iron Nitrides, Article in Metallurgical and Materials Transactions A · January 2006, DOI: 10.1007/s11661-006-0003-4

ЗМІСТ

МАЛІЧ М.Г., КАТАН В.О., РІЗО З.М., КРЕСС Д.В., АВРАМЕНКО С.О.	5
АНАЛІЗ РУЙНУВАННЯ ПРИЗМАТИЧНИХ УСІЧЕНО-КОНУСНИХ ЗРАЗКІВ ГІРСЬКОЇ ПОРОДИ ПРИ СИМЕТРИЧНОМУ ТА АСИМЕТРИЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ	5
MALICH M.G., KATAN V.O., RIZO Z.M., KRESS D.V., AVRAMENKO S.O.	5
ANALYSIS OF DESTRUCTION OF PRISMATIC TRUNCATED-CONICAL ROCK SPECIMENS UNDER SYMMETRICAL AND ASYMMETRIC LOADING	5
КРАВЧЕНКО В.П., ГЛАДКИХ В.А., АНОСОВ О.В., РУБАН А.В., РЯБЦЕВ О.О.	10
АНАЛІЗ ЯКОСТІ ШИХТОВИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ВИСОКОКРЕМНИСТОГО ФЕРОСИЛІЦІЮ	10
KRAVCHENKO V.P., GLADKIKH V.A., ANOSOV O.V., RUBAN A.V., RYABTSEV O.O.	10
ANALYSIS OF THE QUALITY OF CHARGE MATERIALS IN THE PRODUCTION OF HIGH-SILICON FERROSILICON	10
ЗАСЕЛЬСЬКИЙ В. Й., ПОПОЛОВ Д. В.	15
ПЕРСПЕКТИВНІ КОНСТРУКЦІЇ ГРОХОТІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПІДГОТОВКИ ШИХТОВИХ МАТЕРІАЛІВ ПЕРЕД СПІКАННЯМ І ПЛАВКОЮ	15
ZASELSKYI V., POPOLOV D.	15
PROSPECTIVE DESIGNS OF SCREENS FOR IMPROVING THE QUALITY OF CHARGE MATERIALS PREPARATION BEFORE SINTERING AND MELTING	15
ДЕЙНЕКО Л.М. СТОЛБОВИЙ В.О. РОМАНОВА Н.С. КРИВЧИК Л.С. ПІНЧУК В.Л. МАЧУЛА Н.В. ⁶	22
ФОРМУВАННЯ АЗОТОВАНОГО ШАРУ СТАЛІ 5x3в3мфс, ОТРИМАНОВОГО В ГАЗОПЛАЗМОВОМУ ДВОСТУПЕНЕВОМУ ВАКУУМНО-ДУГОВОМУ РОЗРЯДІ	22
ЗМІСТ	31
CONTENT	32

CONTENT

МАЛІЧ М.Г., КАТАН В.О., РІЗО З.М., КРЕСС Д.В., АВРАМЕНКО С.О.	5
АНАЛІЗ РУЙНУВАННЯ ПРИЗМАТИЧНИХ УСІЧЕНО-КОНУСНИХ ЗРАЗКІВ ГІРСЬКОЇ ПОРОДИ ПРИ СИМЕТРИЧНОМУ ТА АСИМЕТРИЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ	5
MALICH M.G., KATAN V.O., RIZO Z.M., KRESS D.V., AVRAMENKO S.O.	5
ANALYSIS OF DESTRUCTION OF PRISMATIC TRUNCATED-CONICAL ROCK SPECIMENS UNDER SYMMETRICAL AND ASYMMETRIC LOADING	5
КРАВЧЕНКО В.П., ГЛАДКИХ В.А., АНОСОВ О.В., РУБАН А.В., РЯБЦЕВ О.О.	10
АНАЛІЗ ЯКОСТІ ШИХТОВИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ВИСОКОКРЕМНИСТОГО ФЕРОСИЛІЦІЮ.....	10
KRAVCHENKO V.P., GLADKIKH V.A., ANOSOV O.V., RUBAN A.V., RYABTSEV O.O.	10
ANALYSIS OF THE QUALITY OF CHARGE MATERIALS IN THE PRODUCTION OF HIGH-SILICON FERROSILICON.	10
ЗАСЕЛЬСЬКИЙ В. Й., ПОПОЛОВ Д. В.	15
ПЕРСПЕКТИВНІ КОНСТРУКЦІЇ ГРОХОТІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПІДГОТОВКИ ШИХТОВИХ МАТЕРІАЛІВ ПЕРЕД СПІКАННЯМ І ПЛАВКОЮ	15
ZASELSKYI V., POPOLOV D.	15
PROSPECTIVE DESIGNS OF SCREENS FOR IMPROVING THE QUALITY OF CHARGE MATERIALS PREPARATION BEFORE SINTERING AND MELTING .	15
ДЕЙНЕКО Л.М. СТОЛБОВИЙ В.О. РОМАНОВА Н.С. КРИВЧИК Л.С. ПІНЧУК В.Л. МАЧУЛА Н.В. ⁶	22
ФОРМУВАННЯ АЗОТОВАНОГО ШАРУ СТАЛІ 5Х3В3МФС, ОТРИМАНОГО В ГАЗОПЛАЗМОВОМУ ДВОСТУПЕНЕВОМУ ВАКУУМНО-ДУГОВОМУ РОЗРЯДІ	22
ЗМІСТ	31
CONTENT	32