

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

ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА МЕТАЛУРГІЇ

№1
(138)
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 1 (138) 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. 8,83

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 відповідальності 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.Безшкурєнко

©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

#1
(138)
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 1 (138) 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. 8,83

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

<https://doi.org/10.34185/tpm.1.2023.01>

Savkyn S.V., Balakin V.F.

Determination of residual stresses in the production of welded pipes by magnetic memory

Савкін С.В., Балакін В.Ф.

Визначення залишкових напружень при виробництві зваряних труб за магнітною пам'яттю

The article proposes the use of the metal magnetic memory method for the purpose of detecting and measuring residual stresses in welded seams and heat-affected zones of longitudinal welded pipes. The experimental study was divided into the following stages: measurement of residual stresses in the weld section of a pipe that has not undergone heat treatment; measurement of residual stresses in the weld section of the heat-treated pipe; analysis of the results obtained. The measurements were carried out in the cross section of the samples, which made it possible to obtain data on the residual stresses contained in the weld, the near-weld zone and the base metal of the pipe.

The study confirmed the feasibility of using the metal magnetic memory method to measure residual stresses in welded pipes for further development and modernization of the technological process for the production of longitudinal welded pipes.

Key words: metal magnetic memory method, weld seam, heat-affected zone, residual stresses, pipe billet.

У статті запропоновано використання методу магнітної пам'яті металу для виявлення та вимірювання залишкових напружень у зварних швах і зонах термічного впливу поздовжньозваряних труб. Експериментальне дослідження було поділено на наступні етапи: вимірювання залишкових напружень в ділянці зварного шва труби, що не пройшла термічну обробку; вимірювання залишкових напружень у зварному перерізі термообробленої труби; аналіз отриманих результатів. Вимірювання проводили в поперечному перерізі зразків, що дало змогу отримати дані про залишкові напруження, що містяться в зварному шві, пришовній зоні та основному металі труби.

Проведене дослідження підтвердило доцільність використання методу магнітної пам'яті металу для вимірювання залишкових напружень у зварних трубах для подальшої розробки та модернізації технологічного процесу виробництва поздовжньозваряних труб.

Ключові слова: метод магнітної пам'яті металу, зварний шов, зона термічного впливу, залишкові напруження, трубна заготовка.

Introduction. Increasing the competitiveness of products is directly related to the introduction of progressive methods for obtaining new grades of pipe steels and technologies for their production, improving the internal structure of the metal as a result of removing internal stresses, as well as improving the properties of products obtained by welding.

Formation of high-quality geometry of large-diameter pipes ($D \leq 1420$ mm) according to the "sheet-tube" technological conversion [1] begins in the bending press, where the formed profile of the edge sections of the pipe billet should ensure smooth conjugation with the main perimeter of the pipe on the step-by-step press. It should be borne in mind that after removing the load, residual stresses are formed in the sheet blank, causing the sheet formed for welding to spring.

Formulation of the problem. Residual stresses are associated with changes in the volume of the metal and structural transformations that occur in the atomic lattice, and persist over time in the absence of external forces. The main reason for their occurrence is the heterogeneity of the deformed state due to different changes in length (volume) in different zones of the body, which can be caused by the following factors: temperature gradient (thermal stresses); inhomogeneity of thermal expansion of various structural

or structural components of the body (heterogeneous structures, bimetals, etc.); phase transformations (phase voltages); inhomogeneity of plastic deformation during molding (residual stress after welding).

Analysis of publications on the topic of research. From scientific sources it is known [2] that in atomic lattices of metals, for various reasons, distortions can occur with violation of the correct arrangement of atoms, for example, dislocations. In this case, the dislocation can be considered as an extra plane wedged between two adjacent planes, and, as it were, expanding the atomic lattice in this place. The atoms located in the planes adjacent to the dislocation shift from their normal (equilibrium) position in the given lattice. The tendency of these atoms to an ordered arrangement also causes the appearance of internal interatomic stresses. The martensitic structure that appears in steel after quenching is characterized by a large number of dislocations, and also has an atomic lattice in which carbon atoms are located between iron atoms. All this leads to the expansion of the lattice, its distortion, and, consequently, causes internal interatomic stresses.

The main methods for determining residual stresses in metals are mechanical and X-ray.

Mechanical methods for measuring residual stresses are based on the principle of elastic unload-

ing of metal when it is released from internal stresses by cutting. By measuring the deformations that occur during cutting, it is possible to calculate the residual stresses according to the formulas of the theory of elasticity.

X-ray methods for determining residual stresses make it possible to directly measure the strains of the crystal lattice when exposed to stresses without destroying the product. These methods are based on determining the distance between crystallographic planes by measuring the angle of reflection of the beam. With such scattering, the interference of the rays occurs, as a result of which only in certain directions the intensity of the rays increases, while in other directions it is weakened.

Analysis of the known methods for measuring stresses and strains in metals allows us to name their main disadvantages [3,4]:

- locality of control, high labor intensity and unsuitability for control of extended sections and surfaces of structures;
- the need for special preparation of the controlled metal surface (cleaning, magnetization, etc.);
- incomparability of depth and area of control and, as a rule, significant error of results;
- the complexity of determining the position of the control sensors in relation to the direction of action of the main stresses and strains;
- compulsory construction of calibration curves on pre-fabricated samples;
- large uncertainty to get into the stress concentration zone during control (or determine it);
- the ability to carry out measurements only in a thin surface layer of metal (less than 0.1 mm) or to determine the average stresses over the thickness;
- relatively low control efficiency.

The purpose of this study is to study the possibility of using the metal magnetic memory method to measure internal stresses in the weld section and the heat-affected zone of longitudinal welded pipes.

X-ray and other traditional methods for measuring internal stresses do not provide a sufficient and understandable picture of the internal state of the metal, therefore, this work proposes a method for measuring stresses MMM [5] (metal magnetic memory method), which is promising for electric pipe production, during the production of welded pipes.

Presentation of the main material. The uniqueness of the magnetic memory method lies in the fact that it is based on the use of the intrinsic magnetic field of the metal under study, which arises in the zones of stable slip bands of a dislocation caused by the action of working loads. As a result of the interaction of the intrinsic magnetic field with the Earth's magnetic field in the stress concentration zone on the surface of the test object, a stray magnetic field gradient is formed, which is recorded by specialized magnetometers. The mechanism of the appearance of an intrinsic magnetic field on dislocation clusters is due to the pinning of domain walls, when these clusters become commensurate with the thickness of the

domain walls. Under no circumstances with artificial magnetization in working structures such a source of information as the intrinsic magnetic field is impossible to obtain. Only in a small external field, such as the Earth's magnetic field, in loaded structures, when the deformation energy is much higher than the energy of the external magnetic field, such information is formed and can be obtained. In this case, the regions of anomalous changes in the magnetic field of leakage are determined, due to the inhomogeneity of the stress-strain state and the presence of zones of stress concentration in the metal. Under the action of working loads, the remanent magnetization and, accordingly, the magnetic field of leakage are redistributed and irreversibly change in the direction of action of the main stresses.

The metal magnetic memory method does not provide a direct quantitative assessment of the acting stresses (unlike, for example, strain gauges). However, it is devoid of the disadvantages indicated above, and allows one to distinguish the elastic deformation region from the plastic one, and allows one to determine the sliding areas of metal layers and the zones of fatigue crack initiation.

When carrying out work on the control of internal stresses, the TSC-1M-4 apparatus (stress concentration meter) was used. The general view of the TSC-1M-4 apparatus is shown in Fig. 1.

According to the principle of operation, the TSC-1M-4 apparatus is a specialized multichannel fluxgate magnetometer based on the phenomenon of electromagnetic induction, namely, the emergence of an EMF (electromotive force) in the measuring coil when the magnetic flux passing through its loop changes. A change in coil flux can be caused by the following factors:

- change in the magnitude or direction of the measured field in time;
- periodic change of position (rotation, oscillation) of the measuring coil in the measured field;
- a change in the magnetic resistance of the measuring coil, which is achieved by a periodic change in the magnetic permeability of the permalloy core (it is periodically magnetized until it is saturated with an auxiliary alternating excitation field).

The control is carried out using a scanning device consisting of a flux-gate transducer and a mechanism that allows, simultaneously with measuring the values of the magnetic field strength H_s , to measure the length of the controlled section [6]. The measuring device displays information about measurements both on the display of the device and through the built-in port on the screen, which makes it possible to determine the most dangerous voltage concentration zones directly on the spot.

The graphs generated by the device describe with the help of lines the nature of the placement and the magnitude of residual stresses in the metal under study. The H_s line is a curve that describes the strength of the magnetic field of the workpiece, and by itself does not carry a complete picture of the

stress concentration zones. Therefore, an additional characteristic is introduced that more accurately depicts the stress concentration zones – the gradient of the magnetic field of the workpiece.

The intensity gradient characterizes the increase or decrease in intensity in an inhomogeneous mag-

netic field per unit distance. This concept is an essential addition to the usual (maximum) characteristic of the magnetic field strength. In the graphs, the gradient of the magnetic field strength is represented by the dH/dx curve.



Fig. 1. General view of the TSC-1M-4 apparatus.

The places where the stress concentration zones are observed are considered to be the extremes of the dH/dx graph curve. On the H_s axis, the values of the magnetic field strength of the workpiece under study are plotted. The L_x axis represents the measurement of the length of the transducer, which makes it possible to say exactly where the stresses are present. The values of the gradient of the magnetic field strength are plotted along the dH/dx axis, it is according to the values of the last two measurement scales that the stress concentration zones are determined.

Research results. During the research work, several test measurements were carried out. In the first part of the study, the internal stresses of a pipe billet with diameters of 100 mm and a length of 150 mm were measured in the section of the welded seam that had not undergone heat treatment. We select 7 zones of stress concentration, of which we will

select the 3 most dangerous zones, for comparison with thermally treated seams. The first coordinate is the scale – L_x , the second – dH/dx . These zones will be the peaks of the curves with coordinates A0(77;130), B0(66;55), C0(19;45). The graph of internal stresses in the section of the welded seam of a pipe that has not passed heat treatment is shown in Figure 2.

In the second part of the study, the internal stresses of the pipe billet, presented in the first part of the experiment, were measured with heat treatment of the welded seam in laboratory conditions. Heat treatment is intended in this case to relieve residual stresses that have arisen in the welded seam and the heat-affected zone as a result of welding the formed sheet blank. The graph of internal stresses after heat treatment of the weld is shown in Figure 3.

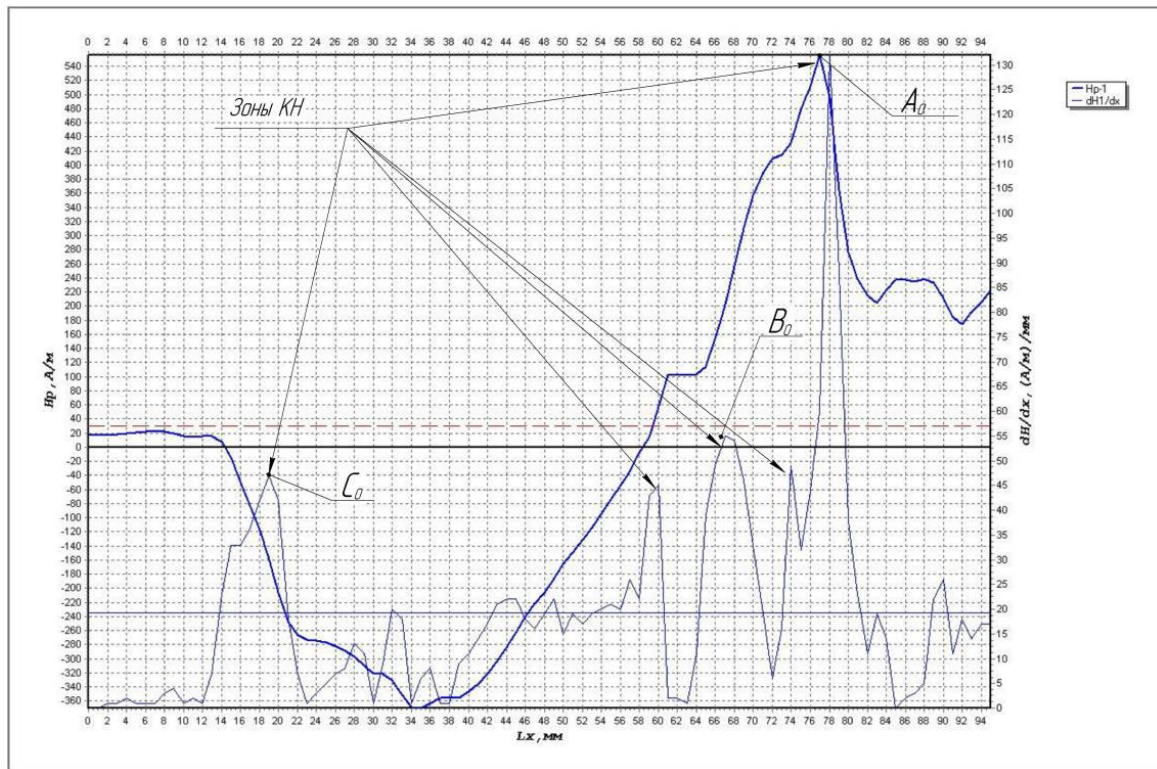


Fig. 2. Internal stresses in the section of the welded seam of a pipe that has not undergone heat treatment

Figure 3 shows 5 zones of stress concentration. From the presented zones, as before, we will select 3 points for comparison. They will be A1(78;84), B1(58;64), C1(6;44). From the graphs obtained, conclusions can be drawn about the difference in the magnitude of the peaks of the stress concentration zones. During the test, it is worth noting that the basic

heat treatment gives the effect of removing internal stresses (as can be seen from the comparison of the extrema of the graphs, which are shown in Figures 2 and 3), as well as from the coordinates of the vertices characterizing the stress concentration zones. Table 1 presents the numerical results of the experiment.

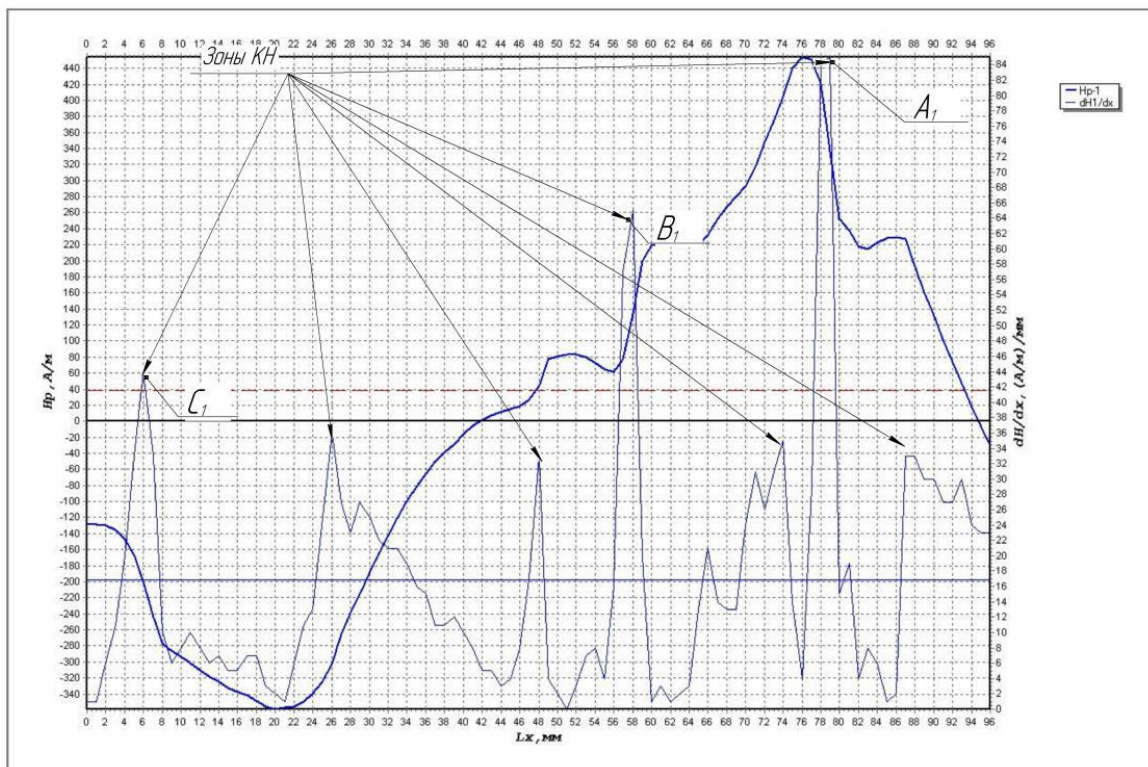


Fig. 3. Stress graph in the section of the welded seam of a thermally treated pipe

Table 1. Results of the experiment.

dH/dx value for the first sample (without heat treatment)	dH/dx value for the second sample (with heat treatment)	Residual stress relief by heat treatment, %	Average stress relief for the sample
130	84	35,38%	7,08%
55	64	-16,36%	
45	44	2,22%	

As can be seen from the values in the table, the heat treatment in laboratory conditions was carried out with some violations of the technological process and did not lead to the necessary indicators for the removal of residual stresses, the general level of stress relief was 7.08%. Of interest is the fact that the values of residual stresses at point B1 after heat treatment increased in comparison with the values of B0. This fact can be explained by the redistribution of

stresses between the sections of points A and B due to heat treatment of the sample.

Conclusions.

The results obtained during the experiment clearly prove the feasibility of using the metal magnetic memory method to measure residual stresses in welded seams and near-weld zones of pipes for further development and modernization of the technological process for the production of welded pipes.

References.

1. Osadchiy V.Ya., Kolikov A.P. *Production and quality of steel pipes*. M.: Publishing house MGUPI, 2012, 370 p.
2. Letunovsky A.P. *Removal of technological residual stresses in metal structures by low-frequency vibration treatment*. Moscow: Mashinostroenie, 2003, 87 p.
3. A.P. Letunovsky, G.V. Novikov. *Removal of residual stresses in metal structures by ultrasound*. M.: "Mechanical engineering", 2003, 91 p.
4. Yutkin L.A. *Electrohydraulic processing of metals, in the book: Electrophysical processing of materials*. Leningrad: "Mechanical Engineering", 1971, 197-252 p.
5. Dubov A.A. *Investigation of metal properties using the magnetic memory method*. M.: Mashinostroenie, 1997, 252 p.
6. Taylor R. A, Astie B, Degauque J. *Direct observation on the interaction between magnetic domain walls and dislocation in iron*. Warwick: J Magn. A Magn Mater, 1983. 972 p.

Надійшла до редколегії / Received by the editorial board: 01.03.2024
Прийнята до друку / Accepted for publication: 20.03.2024

Засельський В.Й., Сусло Н.В., Гук Є.С., Засельський І.В., Панченко Г. М., Зєлова К.Є.
Дослідження впливу ливарного виробництва на забруднення
навколишнього середовища в місті Кривий Ріг

Zaselskiy V., Suslo N., Huk Y., Zaselskiy I., Panchenko H., Zielova K.
Research on the impact of foundry production on pollution of the
environment in the city of Kryvyi Rih

Анотація. В роботі досліджено вплив технологічних процесів ливарного виробництва ТОВ «МЕТІНВЕСТ-КРМЗ» на викиди забруднюючих речовин в навколишнє середовище міста Кривого Рогу.

Аналіз кількості забруднюючих викидів в робочій зоні виготовлення виливок показав, що їх концентрація суттєво (в рази) перевищує гранично допустимі концентрації газоутворення. Для вивчення впливу забруднюючих викидів в атмосферне середовище прилеглих житлових масивів були проаналізовані показники стаціонарних постів екомоніторингу та, за допомогою газоаналізатора OKSI5M-5H, були зроблені виміри газовиділення в житлових будинках цих житлових масивів.

В результаті проведення роботи виявлено, що до газоутворення шкідливих викидів від технологічних процесів ливарного виробництва, які розповсюджуються в прилеглих житлових масивах, слід віднести CO і SO₂.

Дослідженнями встановлено, що якісний екомоніторинг газоутворення від технологічних процесів ливарного виробництва треба робити з урахуванням впливу вологості, тиску та рози вітрів повітря і заміррювальні стаціонарні пости шкідливих викидів треба розташовувати на відстані не більше 1000 м від промислової зони та на висоті від поверхні землі не менше ніж 20 м.

Ключові слова: ливарне виробництво, екомоніторинг, селітебна зона, шкідливі викиди, газовиділення, гранично допустима концентрація, метеорологічні параметри.

Annotation. The work examines the influence of foundry technological processes production of "METINVEST-KRMZ" LLC on pollutant emissions in the environment of the city of Kryvyi Rih. Analysis of the amount of pollutant emissions in the working area of the production of castings showed that their concentration significantly (by several times) exceeds the maximum permissible concentration of gas formation. To study the impact of pollutant emissions in the atmospheric environment of the adjacent residential areas were analyzed indicators of stationary eco monitoring posts and, with the help of gas analyzer OKSI5M-5H, gas emission measurements were made in residential buildings houses of these residential areas.

As a result of the work, it was found that they are harmful to gas formation emissions from technological processes of foundry production, which distributed in nearby residential areas, it should be attributed to CO and SO₂.

Research has established that high-quality eco monitoring of gas formation from technological processes of foundry production should be done taking into account the influence of humidity, pressure and winds of the air and measuring stationary posts of harmful emissions must be located at a distance of no more than 1000 m from the industrial zone and at a height of at least 20 m from the ground surface.

Keywords: foundry production, eco monitoring, settlement zone, harmful emissions, gas release, maximum permissible concentration, meteorological parameters.

Вступ. Кривий Ріг є найпотужнішим промисловим центром не тільки України, а також і всього Європейського континенту. На теперішній час на його теренах розташувались потужні підприємства, головним чином гірничо-металургійної галузі, котрі суттєво впливають на забруднення навколишнього середовища.

Екологічним проблемам і їх вирішенню в місті Кривий Ріг присвячено багато різноманітних досліджень, але по-перше не всі вони втілюються в життя, а по-друге життя вимагає нових підходів в оцінюванні і дослідженні технологічних процесів, які погіршують стан атмосферного повітря навколишнього середовища міста.

**Аналіз літературних даних та постанова за-
дачі.** З співвідношення викидів основних забруднюючих речовин атмосферного повітря в місті, яке наведено в роботах [1-5] встановлено, що основна доля складається з газовиділення.

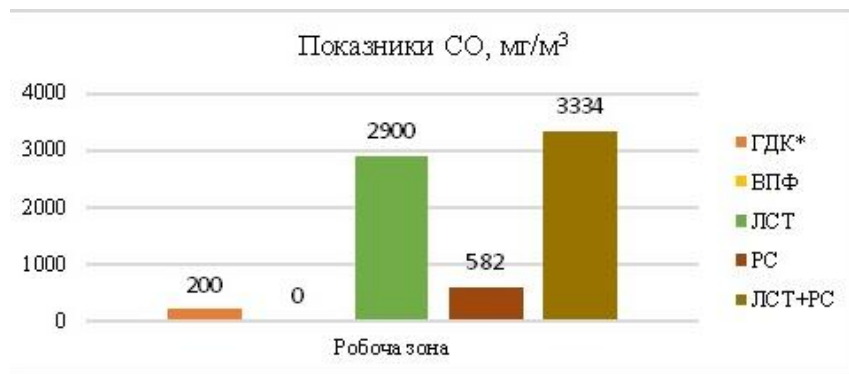
В той же час в роботі [6] встановлено вплив технологічних процесів ливарного виробництва на викиди забруднюючих речовин в робочих зонах заливки форм на ТОВ «МЕТІНВЕСТ-КРМЗ», зведени показники яких представлені на рис.1 З наведених гістограм видно, що в робочих зонах заливки форм є значне виділення чадного газу та сірчаного ангідриду, значення котрих суттєво (в рази) перевищує гранично допустимі концентрації газоутворення.

Оскільки ТОВ «МЕТІНВЕСТ-КРМЗ» знаходиться в межах житлових районів міста [7], є потреба в проведенні екомоніторингу, який би дозволив оцінити вплив ливарного виробництва на забруднення навколишнього середовища.

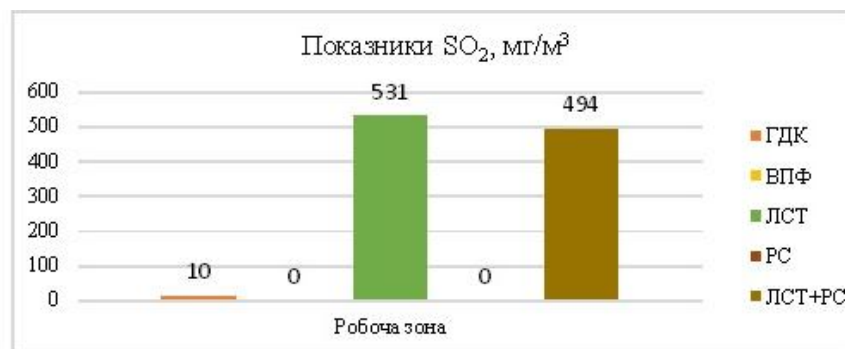
Отже, проведення досліджень по впливу ливарного виробництва на забруднення навколишнього середовища в місті Кривий Ріг є актуальним і важливим науковим завданням.

© Засельський В.Й.
Сусло Н.В.
Гук Є.С.
Засельський І.В.
Панченко Г. М.
Зєлова К.Є.

Zaselskiy V.
Suslo N.
Huk Y.
Zaselskiy I.
Panchenko H.
Zielova K.



а)



б)

Рис. 1 Зведені показники вмісту CO (а) та SO₂ (б) в робочій зоні заливки форм на ТОВ «МЕТІНВЕСТ-КРМЗ»

Мета і завдання досліджень полягає в встановленні впливу технологічних процесів ливарного виробництва, яке розташовано в районах компактного проживання населення на стан атмосферного повітря в прилеглих житлових масивах.

Матеріали та методи досліджень. Для проведення аналізу впливу забруднюючих викидів в атмосферне середовище прилеглих житлових масивів були проаналізовані показники стаціонарних постів екомоніторингу [8], які розташовані на відстані більш ніж 1000м від ливарних цехів промислового підприємства ТОВ «МЕТІНВЕСТ-КРМЗ» за адресами: ПАС №1 мікрорайон Індустріальний, 69А; ПАС №2 вул. Незалежності України, 24. Також, за допомогою газоаналізатора OKSI5M-5H, були зроблені виміри газовиділення в житлових будинках за адресами: вул. Лісового буд.6 (9 поверх) і вул. Незалежності буд. 24 (7 поверх).

Спостереження здійснювались за двома забруднюючими газоутворюючими речовинами: сірчанам ангідридом (SO₂) та оксидом вуглецю (CO).

Окрім цього, оброблялись метеорологічні параметри атмосферного повітря (атмосферний тиск, швидкість та напрямок вітру, вологість повітря) селітебної зони.

Дослідження виконувались згідно фактичного графіка заливки форм в ливарних цехах (ФСЛЦ

1,2) ТОВ «МЕТІНВЕСТ-КРМЗ» в період з 20.04 по 30.04.2021 р., який наведено на рис.2.

Результати досліджень та обговорення їх результатів. Проаналізувавши дані по кількості заливок в ливарних цехах за період з 20.04 по 30.04.2021 р. (див.рис.2) та середньодобові дані по показникам забруднюючих речовин по постах ТОВ «МЕТІНВЕСТ-КРМЗ» ПАС №1, ПАС №2, які наведені на рис.3, бачимо певну не відповідність з показниками, отриманими в результаті досліджень, при замірах викидів відповідних забруднюючих речовин (CO, SO₂) в робочій зоні заливки форм (див.рис.1).

Така розбіжність показників обумовлена похибкою, яка пояснюється тим, що не враховані метеопараметри (швидкість та напрямок вітру, тиск, вологість повітря), які в значній мірі впливають на розповсюдження викидів у атмосферне повітря прилеглих житлових масивів. Також необхідно враховувати, що пости встановлені на двоповерхових комунальних будівлях, висота яких не перевищує 5 м, а висота цеху складає ~ 20м, тобто гази, які відходять від залитих форм в більшості піднімаються вгору цеху і через аераційні ліхтарі потрапляють в атмосферу.

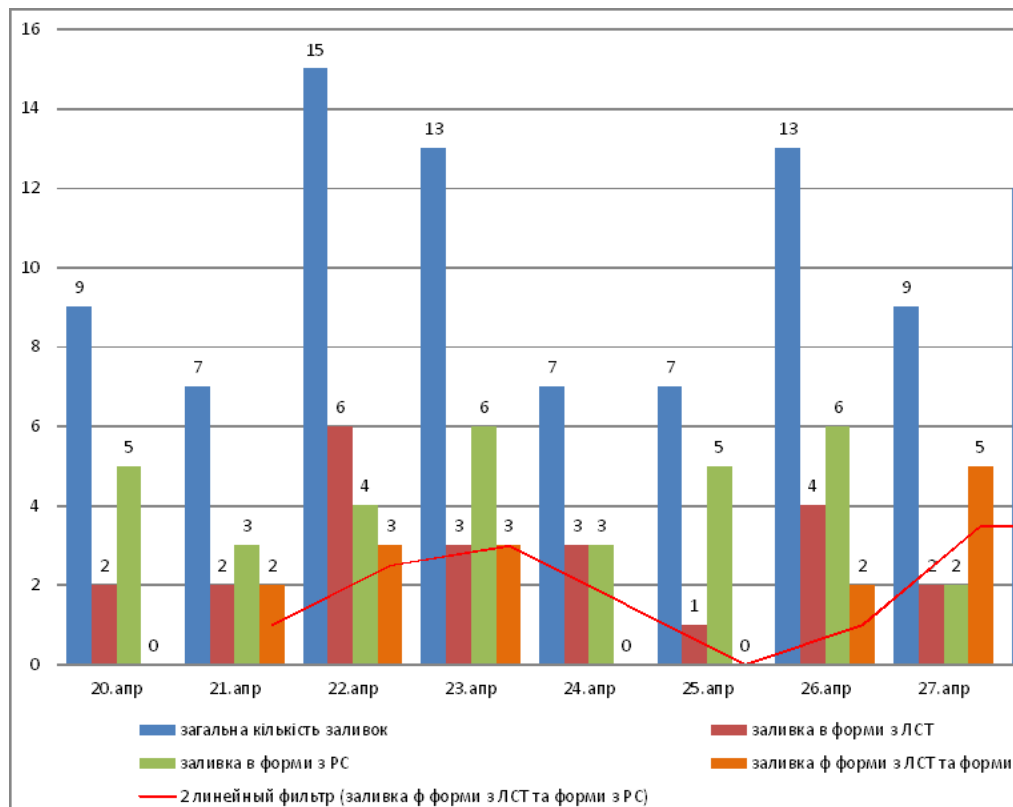


Рис.2 Кількість заливок на ТОВ «МЕТІНВЕСТ-КРМЗ» в період з 20.04 по 30.04.2021 р.

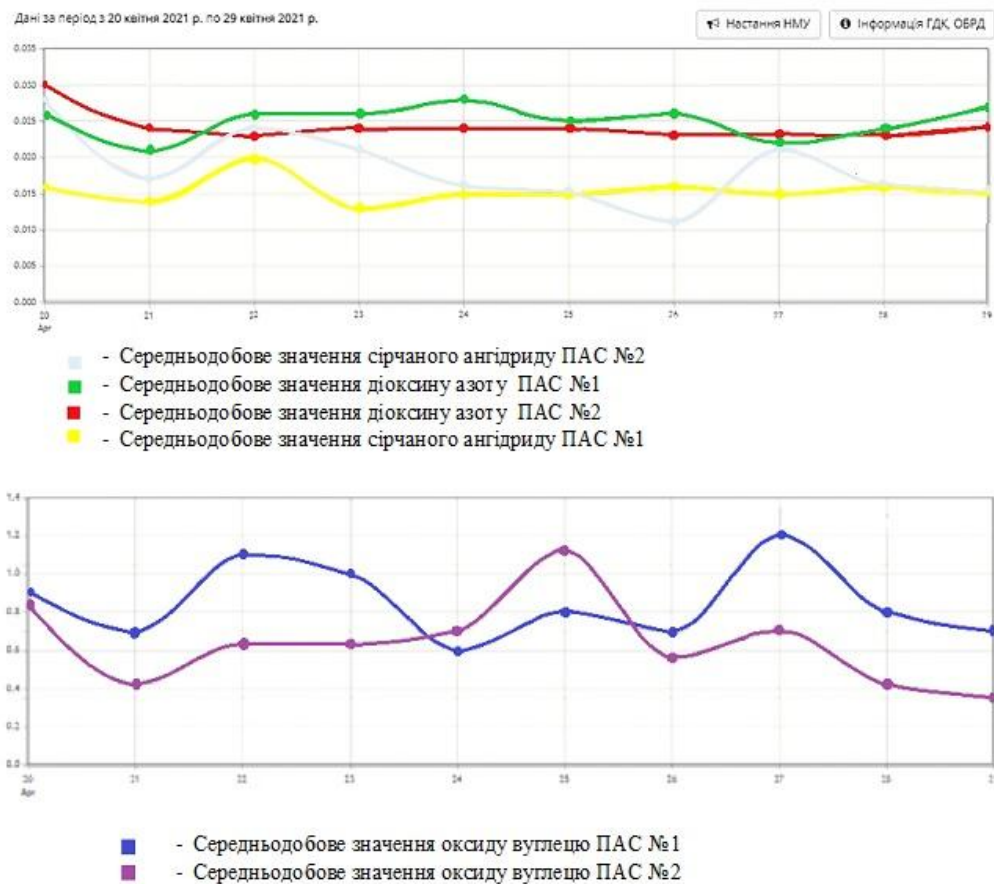
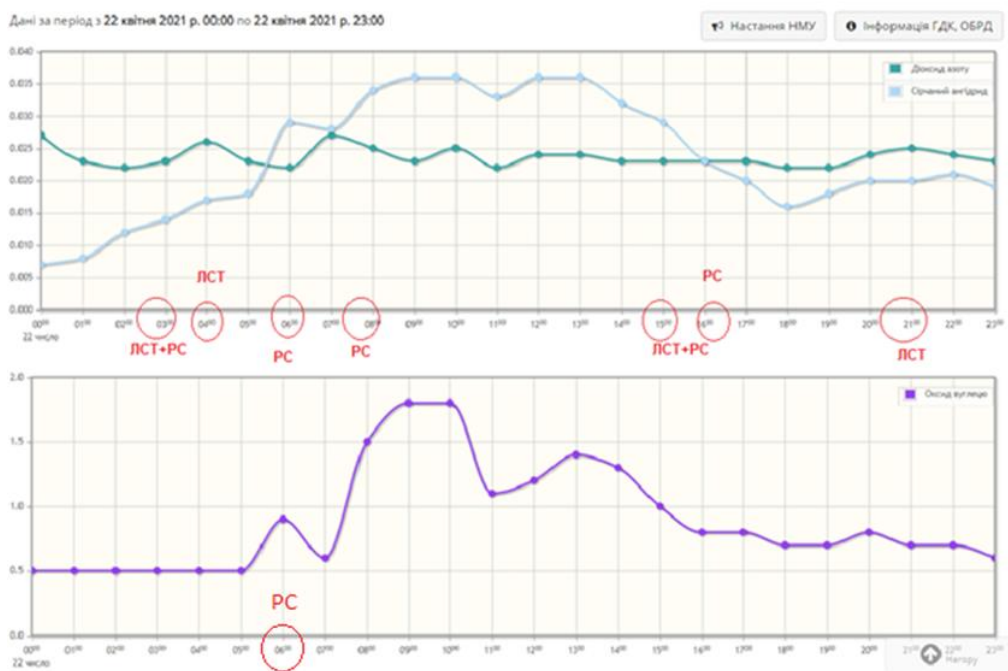


Рис.3 Середньодобові показники забруднюючих речовин по посту ПАС №1 (мкр. Індустріальний, 69А). ПАС №2 (вул. Незалежності України, 24).



А)



Б)

Рис. 4 Поточні показники екомоніторингу шкідливих викидів за 22.04.2021р.: а – ПАС№1, б – ПАС №2

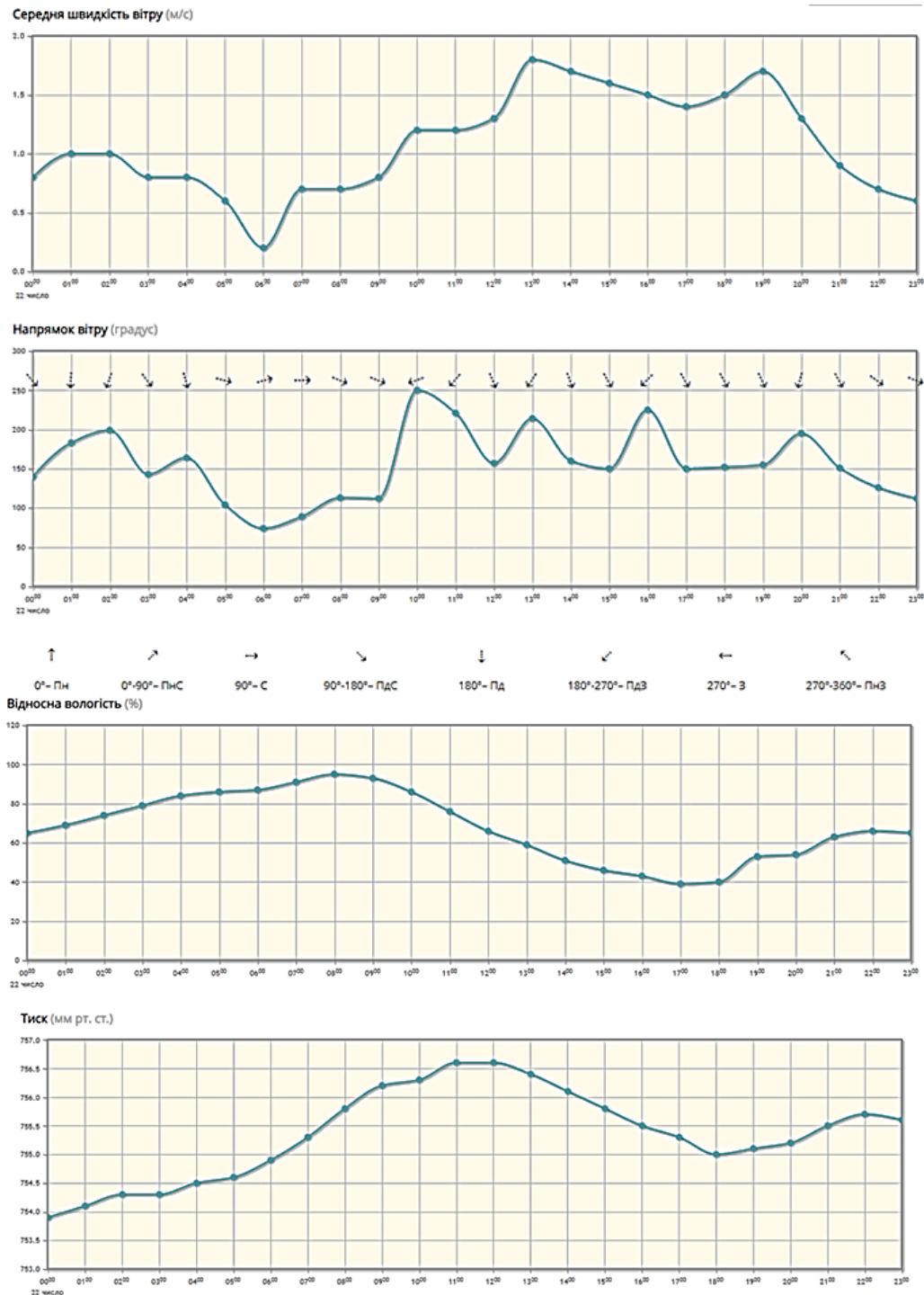


Рис. 5 (а) Поточні показники метеопараметрів 22.04.2021р.:а – ПАС№1, б – ПАС №2

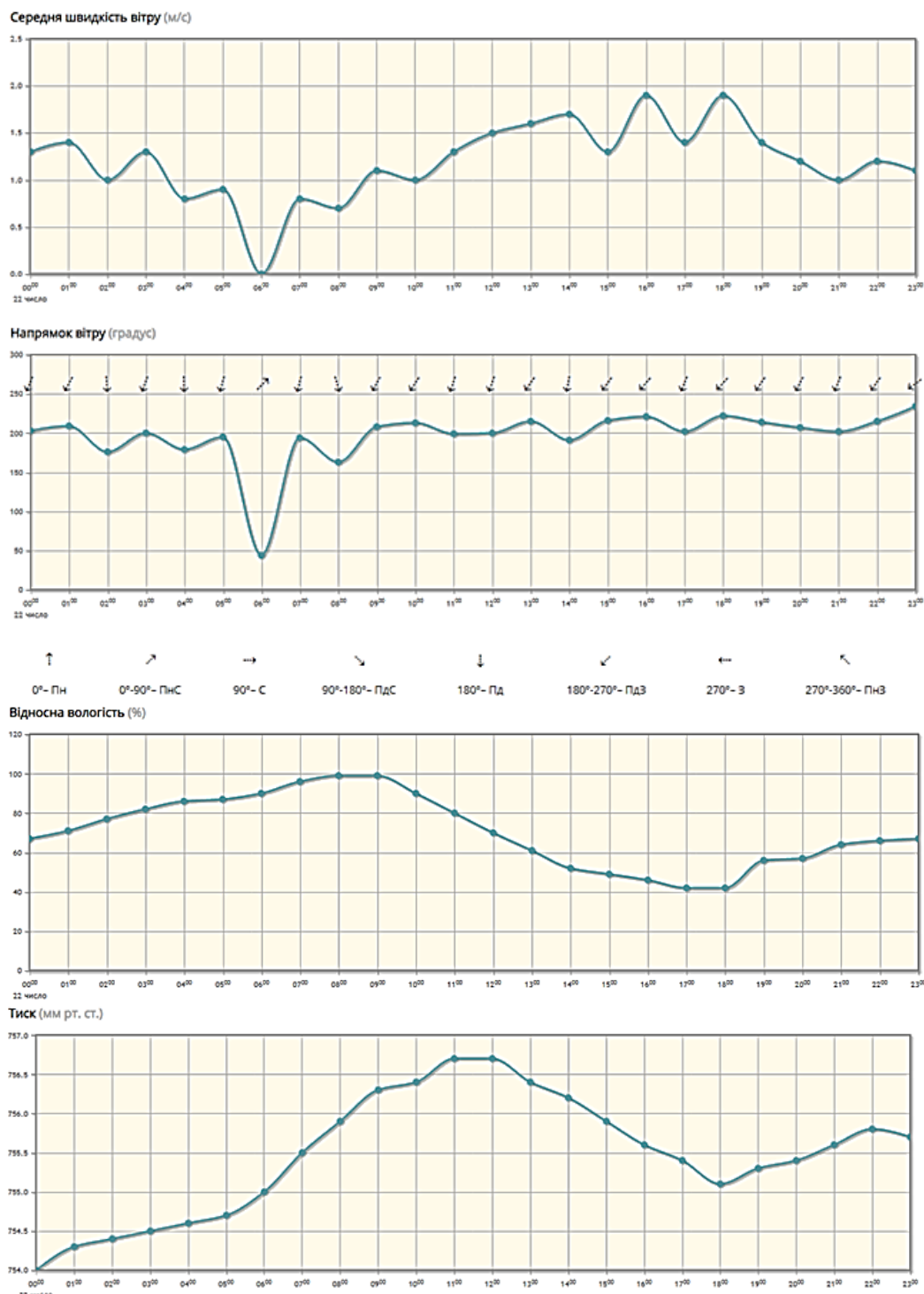


Рис. 5 (б) Поточні показники метеопараметрів 22.04.2021р.: а – ПАС №1, б – ПАС №2

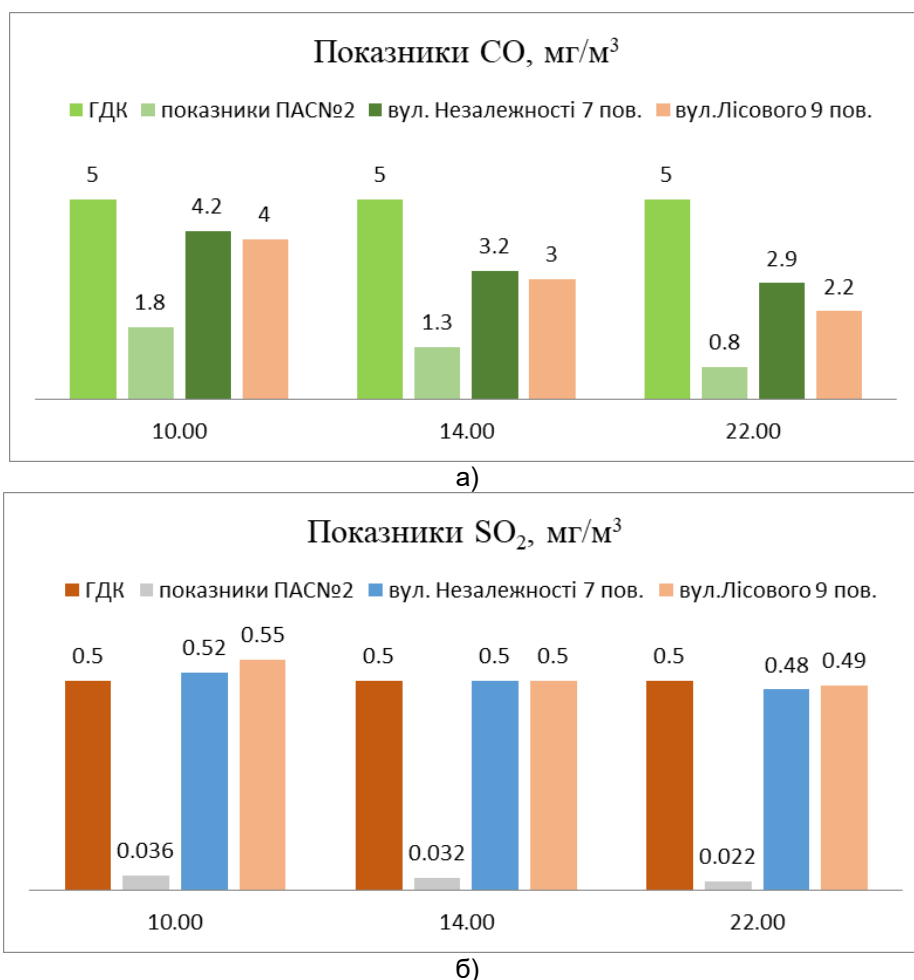


Рис.6 Зведені показники вмісту CO (а) та SO₂(б) в житловій зоні на м-ні Східний

Проте, пікові значення на постах (ПАС №1, ПАС №2) вказують на дію викидів забруднюючих речовин (CO, SO₂) в робочій зоні ливарних цехів ТОВ «МЕТІНВЕСТ-КРМЗ» відповідно до кількості плавків і відповідають реальності. Тому в подальшому було виконано аналіз впливу метеорологічних параметрів та кількості плавків з розливкою у форми з використанням лігносульфонату та рідкого скла на показники концентрацій забруднюючих речовин та розповсюдження їх у атмосферному повітрі прилеглих до ТОВ «МЕТІНВЕСТ-КРМЗ» житлових масивів.

Характерний аналіз впливу кількості плавків на кількість шкідливих викидів, зафіксованих на постах екомоніторингу (ПАС №1, ПАС №2) був виконаний за 22 квітня 2021р. Цей день було обрано тому, що спостерігалась найбільша інтенсивність розливки розплаву у форми з пов'язуючими (див.рис.4, де червоними колами виділені години розливки), та призвело до збільшення кількості шкідливих викидів (CO, SO₂) в зоні прилеглих житлових масивів, що підтверджено даними постів екомоніторингу (див.рис.4, піки CO і SO₂ в період з 9:00 до 13:00 годин). Однак з отриманих даних видно, що кількість шкідливих викидів, зафіксованих на постах не перевищує гранично допустимі концентрації (Згідно Наказу Міністерства охорони

здоров'я України від 14 січня 2020 року № 52. Про затвердження гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин в атмосферному повітрі населених місць.). На наш погляд це пояснюється не зовсім вдалим розташуванням постів по відстані від підприємства і висоті від поверхні землі, та впливом метеопараметрів, які наведені на рис.5.

Так, наприклад, 22.04.2021 р. спостерігаються пікові значення по CO і SO₂ на обох постах екомоніторингу (ПАС №1, ПАС №2) одночасно, що пояснюється зміною напрямку вітру. Тобто, вранці переважно напрямок вітру був східний, а потім змінився на південно-західний, тому і появу збільшення концентрацій шкідливих газів спостерігаємо на ПАС №2 раніше, ніж на ПАС №1. При цьому швидкість вітру зростала після 6-ої години ранку з 0,3 м/с до 1,9 м/с на 13 годину, що й пояснює показники сплесків на обох постах приблизно в один період. Окрім цього, як показують дослідження з 20.04 по 30.04 на концентрацію шкідливих газових викидів впливає підвищення тиску та вологості повітря, а саме, з підвищенням вологості і тиску концентрація шкідливих газоутворюючих речовин зростає. Тому для селітебної зони, в той же день, були зроблені виміри досліджуваних параметрів в житловому масиві на мікрорайоні Східний по вул.

Незалежності та вул. Лісового на орієнтовній висоті від поверхні землі 21 і 27 метрів відповідно. Заміри виконувались о 10⁰⁰, 14⁰⁰ та 22⁰⁰ годинах і наведені на рис.6. Отримані дані порівнювались з показниками ПАС №2, оскільки він розташований найближче до цієї житлової зони.

Як видно з отриманих даних, показники по СО не перевищують ГДК, але їх значення в декілька разів перевищують показники, які надає ПАС №2 і наближаються до критичних (див. рис.6, 10⁰⁰ години ранку).

При аналізі показників по SO₂, видно що отримані значення більше ніж на порядок перевищує показники ПАС №2, та суттєво наблизились до ГДК, і на 10-ту годину ранку перевищують ГДК.

Таким чином з'ясовано, що технологічні процеси ливарного виробництва на ТОВ «МЕТІНВЕСТ-КРМЗ» впливають на забруднення навколишнього середовища в місті Кривий Ріг і потребують якісно-

го екомоніторингу та вирішення цієї екологічної проблеми.

Висновки. Проаналізувавши технологічні процеси отримання виливок з використанням лігносульфонату та рідкого скла в якості пов'язуючих матеріалів для формовки в ливарних цехах, можна стверджувати, що вони є забруднювачами навколишнього середовища і суттєво впливають на стан атмосферного повітря в прилеглих житлових масивах міста.

Встановлено, що на концентрацію шкідливих викидів від технологічних процесів ливарного виробництва, які розповсюджуються в житлових масивах, впливає вологість, тиск та роза вітрів.

Окрім цього з'ясовано, що якісний екомоніторинг газоутворення від технологічних процесів ливарного виробництва треба робити на відстані не більше 1000 м від промислової зони та на висоті від поверхні землі не менше ніж 20 м.

Бібліографічний опис

1. Коцюруба В.В. На шляху до повного вивчення гірничо-промислових ландшафтів Кривбасу. Кривий Ріг: Природа Криворіжжя КДПУ, 2017. 11 с.
2. ТОП 10 забруднювачів атмосферного повітря м. Кривий Ріг [електронний ресурс]. Точка доступу: https://kr.gov.ua/ua/news/pg/60420667643404_n/
3. Салій І.В., Павленко О.І., Орехова О.В. Аналіз передчасної смертності населення екологічно небезпечного регіону. Екологічні науки. 2020. № 30. С. 60-63.
4. Салій І.В., Рижченко Н.О., Засельський В.Й., Пополов Д.В. Дослідження та шляхи поліпшення екомоніторингу в місті Кривий Ріг. Екологічні науки. 2020. № 32. С. 16-22.
5. Салій І.В., Павленко О.І., Орехова О.В. Захворюваність органів дихання населення в екологічно небезпечному регіоні. Екологічні науки. 2020. № 31. С. 7-10.
6. Засельський В.Й., Суслі Н.В., Гук Є.С., Панченко Г.М., Засельський І.В. Визначення впливу технологічних процесів ливарного виробництва на викиди забруднюючих речовин. Теорія і практика металургії. 2021. №5. С. 47-52.
7. Метінвест КРМЗ [електронний ресурс]. Точка доступу: <https://metinvestholding.com/ua/about/service/krmz>.
8. Екомоніторинг [електронний ресурс]. Точка доступу: <https://www.krmisto.gov.ua/ua/rc/ecomon/current/meteo/cp/1802/mode/g/dt/2021-04-27/sh/24.html>.

Reference

1. Kotsiuruba V.V. Na shliakhu do povnoho vyvchennia hirnycho-promyslovykh landshaftiv Kryvbasu. Kryvyi Rih: Pryroda Kryvorizhzhia KDPU, 2017. 11 s.
2. TOP 10 zabrudniuvachiv atmosfernoho povitria m. Kryvyi Rih [elektronnyi resurs]. Tochka dostupu: https://kr.gov.ua/ua/news/pg/60420667643404_n/.
3. Salii I., Pavlenko O., Oriekhova O. Analysis of premature mortality of the population of the ecological and dangerous region. Environmental sciences. 2020. №30. S. 60-63.
4. Saliy I., Ryzhenko N., Zaselskyi V., Popolov D. Research and paths to improve the environmental monitoring in the city of Kryvyi Rih. Environmental sciences. 2020. №32. S. 16-22.
5. Salii I., Pavlenko O., Oriekhova O. Disease of the respiratory organs of the population of the ecological and dangerous region. Environmental sciences. 2020. №31. S. 7-10.
6. Zaselskyi V., Suslo N., Huk Y., Panchenko H., Zaselskyi I. Determining the impact of foundry production processes on pollutant emissions. Theory and practice of metallurgy. 2021. №5. S. 47-52.
7. Metinvest KRMZ [elektronnyi resurs]. Tochka dostupu: <https://metinvestholding.com/ua/about/service/krmz>.
8. Ecomonitoring [elektronnyi resurs]. Tochka dostupu: <https://www.krmisto.gov.ua/ua/rc/ecomon/current/meteo/cp/1802/mode/g/dt/2021-04-27/sh/24.html>.

Маліч М.Г., Кресс Д.В., Авраменко С.О.

Оцінка енергетичної ефективності щоківих дробарок з простим і складним рухом щоки

Malich M.G., Kress D.V., Avramenko S.O.

Evaluation of energy efficiency of jaw crushers with simple and compound jaw movement

Мета. Оцінка енергетичної ефективності щоківих дробарок з простим і складним рухом щоки на основі математичного моделювання та використання встановлених закономірностей напружень та деформацій у гірській породі при взаємодії з робочим інструментом.

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-подовження деформація» зразків; факти та явища руйнування гірських порід; узагальнення теоретичних закономірностей, що виникають при силовому контакті інструменту з породою в дробарках.

Наукова новизна. При асиметричних контактних дотичних напруженнях в твердому тілі, що деформується, формуються горизонтальні напруження розтягу, при цьому чисельні значення цих напружень зі збільшенням коефіцієнта контактної тертя зростають, а межа міцності на стискання і питома енергія руйнування гірської породи суттєво знижується.

Результати. Асиметричне навантаження породи створюється в щоківих дробарках зі складним рухом щоки, в дробарках з простим рухом щоки реалізується більш енергоємне симетричне навантаження, що вимагає збільшувати потужність приводу.

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

Ключові слова: гірські породи, теорії руйнування, щоківий дробарок, контактне тертя, дотичні напруження, асиметрія, енергія руйнування.

Goal. Assessment of the energy efficiency of jaw crushers with simple and complex jaw movement based on mathematical modeling and the use of established patterns of stresses and deformations in the rock during interaction with the working tool.

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 diagrams of "normal stress-longitudinal strain" of samples; facts and phenomena of rock destruction; generalization of theoretical regularities that arise during the force contact of the tool with the rock in crushers.

Scientific novelty. With asymmetric contact tangential stresses in a deforming solid body, horizontal tensile stresses are formed, while the numerical values of these stresses increase with an increase in the contact friction coefficient, and the compressive strength limit and the specific energy of destruction of the rock significantly decrease.

The results. An asymmetric rock load is created in jaw crushers with a complex movement of the cheek, in crushers with a simple movement of the cheek, a more energy-intensive symmetrical load is implemented, which requires increasing the power of the drive.

Practical significance. Creation of asymmetric load conditions using contact friction forces, taking into account the frictional and strength characteristics of the material being destroyed, will allow to significantly reduce energy consumption during disintegration in jaw crushers with complex jaw movement.

Key words: rocks, theories of destruction, jaw crusher, contact friction, tangential stresses, asymmetry, energy of destruction.

Вступ. Існуючі масові технології дезінтеграції мають низьку ефективність (насамперед енергетичну). І це при тому, що витрати енергії на дроблення та подрібнення гірських порід, вже сьогодні становлять десятку частину всієї виробленої в країні електроенергії, та продовжують зростати [1].

Якщо врахувати, що крім переробки мінеральної сировини процеси руйнування твердих матеріалів широко застосовуються в будівельному, целюлозно-паперовому виробництві, для підготовки деревини, у харчовій промисловості, виробництві медичних препаратів, при переробці побутових та

промислових відходів та в інших галузях, то можна зробити висновок, що вони є одними з наймасовіших і водночас енерго-, метало-, капітало-ємних та трудомістких технологічних процесів. Поряд з цим існуючі технології дезінтеграції не задовольняють низці вимог промислового виробництва [2,3], зокрема при збагаченні корисних копалин та при підготовці гірничо-металургійної та хімічної сировини, обладнання для дезінтеграції, яке серійно випускається, вже не забезпечує отримання необхідної енергетичної ефективності дезінтеграції [4].

© Маліч М.Г. – к.т.н., доц. УДУНТ
Кресс Д.В. – аспірант ІГТМ
Авраменко С.О. – аспірант ІГТМ

Malich M. – c.t.s., docent USUST
Kress D. – PhD student at IGTM
Avramenko S. – PhD student at IGTM

У зв'язку з цим виникає потреба в управлінні процесами дезінтеграції і ключем до цього є оцінка несучої здатності гірської породи за різних видів впливу робочих органів дробарок різних типів.

У розумінні закономірностей розподілу витрат на дроблення гірської породи важливо знати, що вони залежать в першу чергу від природи речовини і способу руйнування: розчавлювання, вигин, стирання, удар і так далі. Консервативність галузі не дозволяє в потрібній мірі зробити об'єктивний висновок про енергетичну ефективність різних дезінтеграційних машин.

Все це свідчить про необхідність нових моделей, що описують закономірності дроблення та руйнування гірської породи.

Основна частина. Авторами [5,6] під керівництвом професора Васильєва Л.М. розроблено нову теорію локального руйнування гірської породи при симетричному і асиметричному розподілу контактних дотичних напружень, яка дозволяє керувати процесом руйнування при найменших витратах енергії.

В дослідженні [7] розглянуто розвиток тріщин, які формуються за траекторіями максимальних ефективних дотичних напружень (ТМЕДН) при симетричному та асиметричному навантаженні (рис. 1).

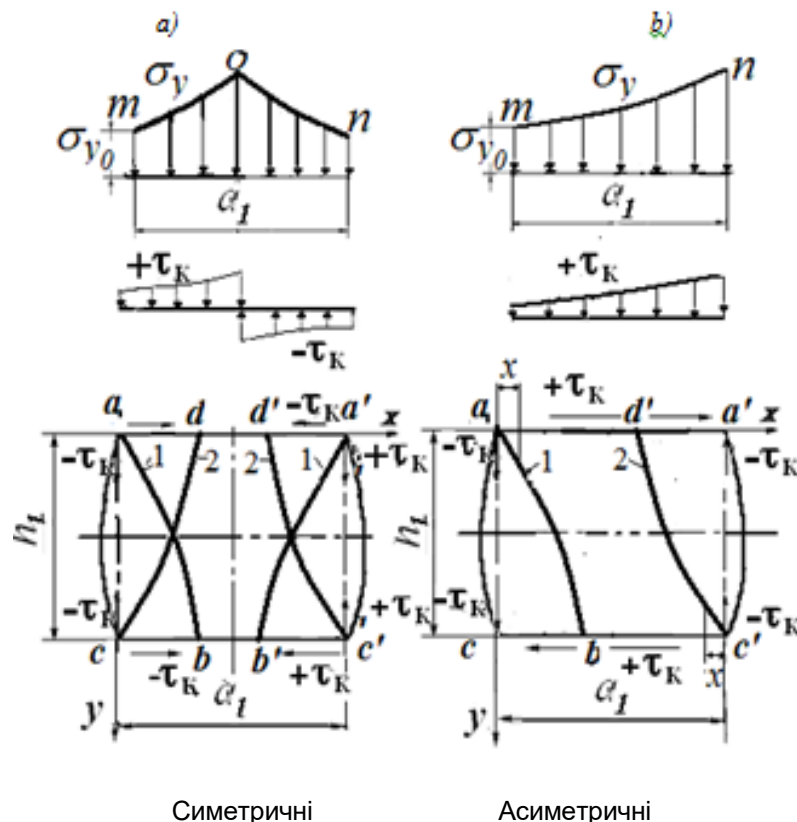


Рисунок 1 – Схеми ТМЕДН при двох видах розподілу дотичних напружень (1-ТМЕДНξ, 2-ТМЕДНη)

Згідно запропонованої теорії [8] при асиметрично спрямованих контактних дотичних напруженнях маємо позитивні знаки на контактних поверхнях при розвитку тріщин зверху вниз за траекторіями максимальних ефективних дотичних напружень (ТМЕДН) ξ (рис. 1, а) і негативні знаки - знизу вгору за ТМЕДН η (рис. 1, б). Для побудови діаграми «питоме зусилля – ордината» для зразків гірської породи при асиметричних напрямках контактних дотичних напружень необхідно визначити питоме зусилля p на майданчику зразка, що не вийшов з-під навантаження.

Формула розподілу контактних нормальних напружень у цьому випадку має такий вигляд [9]

$$\sigma_{y_i} = \sigma_{y_\xi} \cdot e^{\frac{f_k x}{g \cdot h_1}}. \quad (1)$$

де σ_{y_ξ} – нормальне напруження в кутовій точці тіла, що деформується; f_k – коефіцієнт контактної тертя; x – абсциса точки на контактній поверхні; h_1 – висота тіла, яке деформується; g – параметр уточнення розподілу контактних дотичних напружень.

На рис. 1 можна побачити, що частина зразка, що виходить з-під навантаження в процесі розвитку тріщин при асиметричному навантаженні дорівнює $2x$, а частина, що несе, - дорівнює $(a_1 - 2x)$. Тоді питоме зусилля згідно зі схемою (рис. 1, б) з урахуванням виходу частини зразка з-під навантаження на величину $2x$ на підставі формули визначається як

$$\rho = \frac{\sigma_{y\xi}}{a_1 - 2x\xi} \int_0^t \left(1 + \frac{f_k t}{h_1}\right) dt = \frac{gh\sigma_{y\xi}}{f_k(a_1 - 2x\xi)} \left(\exp\left(\frac{f_k(a_1 - 2x\xi)}{gh_1}\right) - 1\right), \quad (2)$$

де $t = a_1 - 2x$.

На підставі отриманого виразу при асиметричному контактному навантаженні розроблено метод розрахунку параметрів діаграм «питоме зусилля – ордината», «напруження – деформація» та енергетичної оцінки процесу руйнування.

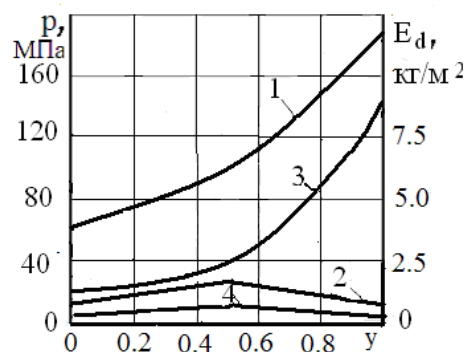
Питоме зусилля при симетричних контактних дотичних напруженнях постійно зростає з розвитком тріщин (рис. 2, крива 1), а при асиметричних спрямованих контактних дотичних напруженнях зростає від ординати вершини тріщини до горизонтальної осі симетрії, потім знижується (рис. 2, крива 2) при цьому максимальне значення питомого зусилля в першому випадку в залежності від показників фізико-механічних властивостей матеріалу в 9-10 разів вище, ніж у другому випадку, при асиметричному розподілі [9].

Для розрахунку питомої енергії руйнування при симетричному та асиметричному розподілі контактних дотичних напружень запропонована формула, що враховує витрати енергії при косому зсуві [9]

$$E_d = \frac{1}{2E} \left(p^2 + \sigma_x^2 - 2\nu p \sigma_x + 2(1 + \nu) \cdot \left(f_k p \left(1 - \frac{2y}{h} \right) \right)^2 \right) \quad (3)$$

Зазначимо, що четвертий член у дужках формули відноситься до асиметричного навантаження. Принагідно слід підкреслити, що розрахунок за цією формулою свідчить про виникнення стискаючих горизонтальних напружень при симетричному навантаженні, а при асиметричному навантаженні – розтягуючих горизонтальних напружень. Умови асиметрично спрямованих контактних дотичних напружень при дробленні крихких тіл є вигіднішими з точки зору витрат енергії на руйнування в порівнянні з симетричними контактними дотичними напруженнями. Питома енергія руйнування при симетричному навантаженні постійно зростає (рис. 2, крива 3), а при асиметричному навантаженні при розвитку тріщини до горизонтальної лінії симетрії зразка зростає, та потім знижується (рис. 2, крива 4). Загалом асиметричне навантаження зразка теоретично забезпечує зниження питомої енергії руйнування в 40 - 45 разів. Це шокує, але розроблений метод для симетричних дотичних напружень перевірений на всіх відомих шести формах руйнування за досить високої збіжності розрахункових та експериментальних даних. При використанні методу змінено єдиний знак контактного тертя.

Для перевірки теоретичних висновків розглянемо взаємодію елементів плит призматичної фо-



$K_n = 10 \text{ МПа}; \rho = 45^\circ$

Рисунок 2 – Залежність питомого зусилля для зразка при симетричному (1), при асиметричному (2) розподілі і відповідно питомої енергії руйнування (3,4) від ординати вершини тріщини

рми з руйнівним середовищем при прикладенні нормальних та тангенціальних навантажень

Конструктивно щокова дробарка [10] (Рис. 3, а) є подібністю преса з вертикальними плитами (щоками) – рухомою та нерухомою. Відмінність від звичайного преса полягає в тому, що рухлива плита здійснює не зворотно-поступальний рух, а коливальний.

Колівальний рух щоки може бути простим чи складним.

Простий рух (рис. 3, б) здійснює щока, підвішена на нерухомій осі. Усі її точки характеризуються однаковим зворотно-поступальним кутовим переміщенням. При зближенні нижнього кінця рухомої щоки з нерухомою щокою відбувається процес дроблення. При розходженні щік відбувається процес розвантаження подрібненого матеріалу.

Складний рух (рис. 3, в) робить щока, підвішена на ексцентрику, який обертається. Траєкторії руху точок рухомої щоки являють собою овалоподібні криві зі значним вертикальним переміщенням у 3 рази більшим за горизонтальний. У решті стадії процесу дроблення при складному русі щоки не відрізняються від простого.

Головна відмінність процесів дроблення матеріалу при складному та простому русі щоки полягає у різній орієнтації сил тертя.



а

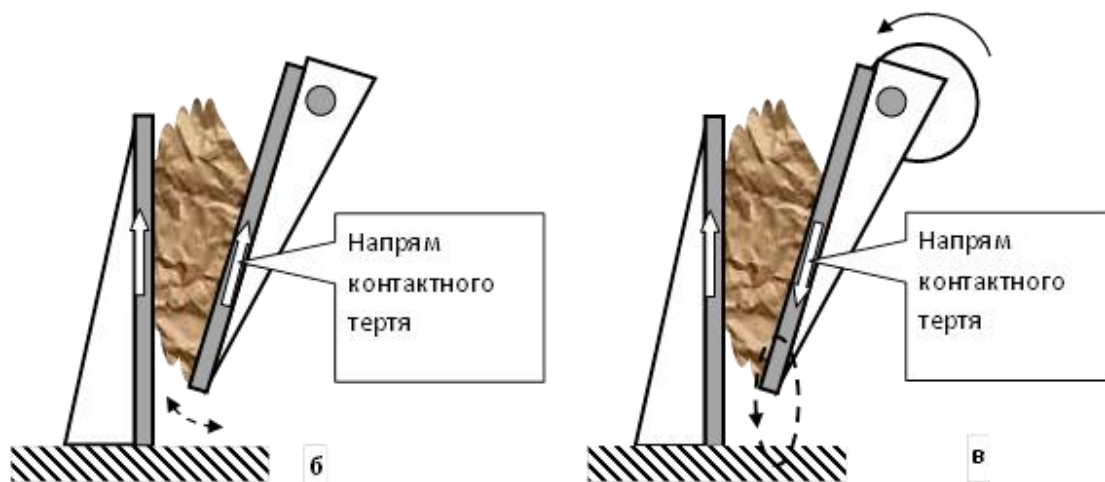


Рисунок 3- Схема щоквої дробарки

а) загальний вид; б) простий рух щоки; в) складний рух щоки.

Сили тертя на контакті породи зі щоками спрямовані в один бік при простому русі, а при складному русі – у різні боки. Тобто. при простому русі щоки дроблена маса перебуває у умовах одновісного стиску, а за складним рухом щоки – за умов ковзного стиснення.

У ході виконання попереднього етапу роботи було зроблено висновок у тому, що з організації технологічних процесів руйнації у стиснутому середовищі слід прагнути створення умов для ковзного стиску, тобто асиметричного навантаження.

Аналіз накопичених показників роботи щоквих дробарок підтверджує цей висновок. Так, у методиці розрахунку споживаної потужності [11] питома робота дроблення приймається рівною 18 МДж/м³ для дробарок з простим рухом щоки та 16,2

МДж/м³ для дробарок зі складним рухом щоки. Тобто. нормативна мінімальна розрахункова ефективність початку режиму ковзного стиску становить 10%. Можна порівняти також каталожні дані щодо продуктивності та встановленої потужності приводу дробарок Вексунського заводу дробильно-подрібнювального обладнання [12] зі складним (ЩДС) та простим (ЩДП) рухом щоки, що наведені на рис. 4.

По горизонтальній осі розташовані значення встановленої потужності приводу, а по вертикальній – номінальна продуктивність при дробленні руди середньої міцності, що вимірюється в кубометрах на годину, та маса дробарки, що вимірюється у тонах.

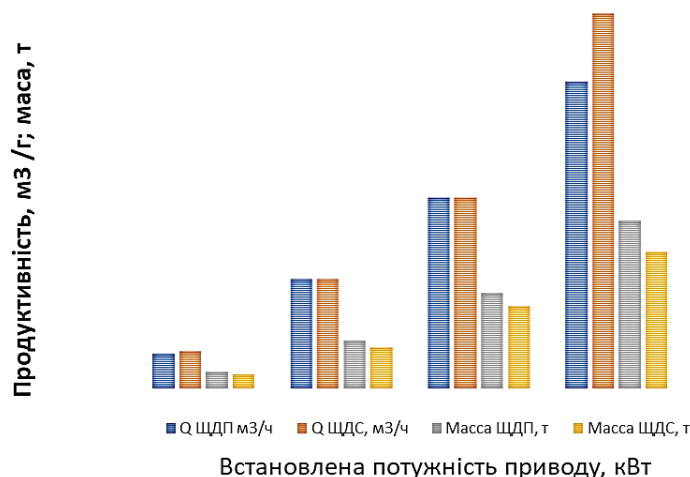


Рисунок 4 - Залежність продуктивності дроблення та маси щекових дробарок від встановленої потужності

Зі збільшенням потужності приводу різниця у продуктивності та масі дробарок зростає. При потужності приводу 75 кВт продуктивність дроблення з ковзним стисканням вище на 10%, а при потужності приводу 250 кВт – вже на 22%. Однакова продуктивність дробарок ЩДС і ЩДП пояснюється, завищеною встановленою потужністю двигуна дробарок зі складним рухом щоки.

Маса дробарок ковзного стискання нижче приблизно на 20%, ніж у дробарок простого стискання.

Хоча ці дані добре підтверджують теоретичні висновки якісно, кількісно експлуатаційні значення (10 – 20%) виявляються помітно меншими за теоретичні, за якими зниження міцності породи при ковзному стисненні може досягати 50% і більше. Ця розбіжність пояснюється кількома причинами. Зокрема, математична модель була побудована для паралельного розташування плит преса, а в дробарці щоки розташовані під деяким кутом, впливом нарізливості на футеровці щік і т.д. Але головна причина – втрати енергії на тертя між поро-

дою і щоками. При складному русі щока переміщується у радіальному, та у тангенціальному напрямках – вздовж дії сили тертя. Саме шкідлива робота сили тертя на тангенціальному переміщенні «з'їдає» значну частину ефекту від ковзного стиснення і призводить до підвищеного зносу футерування в порівнянні з простим рухом щоки в радіальному напрямку.

Висновки. Умови асиметрично спрямованих контактних дотичних напружень при дробленні крихких тіл є більш вигідними з точки зору витрат енергії на руйнування порівняно з симетричними контактними дотичними напруженнями.

Доведена практикою експлуатації перевага у продуктивності дробарок зі складним рухом щоки підтверджує корисність та правильність розроблених математичних моделей асиметричного навантаження та впливу сил тертя на суттєве зменшення енерговитрат у процесі руйнування твердої гірської породи.

Список літератури

1. Большаков В.І., Маліч М.Г., Блохін В.С. Дробильно – сортувальні установки // Фундаментальні і прикладні проблеми гірничої металургії. Сб. наук. праць. Вип.15.-Дніпропетровськ: Ін-т чорної металургії, 2007. (Російською).
2. Назаренко, І. І. Міщук, Є. О. (2019). Дослідження динаміки вібраційної щоквої дробарки двосторонньої дії. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини, 94, 5-15. <https://doi.org/10.32347/gbdmm2019.94.0101>
3. В.С. Блохін, В.І. Большаков, М.Г. Маліч Основні параметри технологічних машин. Машини для дезінтеграції твердих матеріалів: Навчальний посібник ч.1 – Дніпропетровськ; ІМА - прес.- 2006. - 404с. (Російською).
4. Штепа В.П. Теорія. Експеримент. Практика. Енергозбереження при машинному виробництві. Монографія. – Дніпропетровськ: ІМА-прес. – 2009. – 268с. (Російською)
5. Васильєв Л.М., Васильєв Д.Л., Маліч М.Г. Самоорганізація форм руйнування зразків гірських порід при їх стисненні: Монографія.- LAP LAMBERT Academic Publishing.-2021- 243с. (Російською).
6. Васильєв Л.М., Васильєв Д.Л., Малич Н.Г., Ангеловский А.А. Механіка створення форм руйнування зразків гірських порід: Монографія.- Дніпро, ІМА-прес.-2018-172с. (Російською).
7. М. Маліч, Л. Васильєв, Д. Васильєв Оцінка енергії руйнування зразків гірських порід при асиметричному навантаженні // Український гірничий ф-2021. Матеріали міжнародної конференції – Дніпро.- Д.: Національний технічний університет «Дн. політ», 2021. –С. 132-139 .
8. М.Г. Маліч, Д.В. Кресс, З.М. Різо До питання визначення кількості енергії, необхідної для дезінтеграції гірських порід до певного розміру // Системні технології / Регіональний міжвузівський збірник наукових праць – Дніпро, НМетАУ №4 (141).- 2022. – С 115-130, МНБ: Index Copernicus ISSN –print 1562-9945, ISSN – online 2707-7977, DOI 10.34185/1562-9945-4-141-2022.

9. Маліч М.Г. Енергетичний аналіз дроблення рудних матеріалів асиметричним навантаженням // Теорія і практика металургії - Дніпро, НМетАУ №3. 2022. - С.38-44.
10. М.Г. Маліч, Л.М. Васильєв, О.О. Усов Дослідження впливу параметрів навантаження на розподіл напружень, що діють при руйнуванні шихтових матеріалів в дробарках // Металург. та гірничорудн. пром-сть.-2015.-№7.-С.99-106. (Російською).
11. Бедрань Н.Г. Машины для обогащения полезных ископаемых / Н.Г. Бедрань. - К.: Вища школа, 1980.-416с.
12. Справочник по обогащению руд: Специальные и вспомогательные процессы / О.С. Богданов и др. – М.: Недра, 1983.-С.447с.

Reference

1. Bol'shakov V.I., Malich M.G., Bloxin V.S. Drobly`no – sortuval`ni ustanovky` // Fundamental`ni i pry`kladni prob-lemy` girny`choyi metalurgiyi. Sb. nauk. pracz`. Vy`p.15.-Dnipropetrovs`k: In-t chornoyi metalurgiyi, 2007. (Rosijs`koyu).
2. Nazarenko, I. I. Mishhuk, Ye. O. (2019). Doslidzhennya dy`namiky` vibracijnoyi shhokovoyi drobarky` dvostoronn`oyi diyi. Girny`chi, budivel`ni, dorozhni ta melioraty`vni mashy`ny`, 94, 5-15.
<https://doi.org/10.32347/gbdtmm2019.94.0101>
3. V.S. Bloxin, V.I. Bol'shakov, M.G. Malich Osnovni parametry` texnologichny`x mashy`n. Mashy`ny` dlya dezintegraciyi tverdyy`x materiy`aliv: Navchal`ny`j posibny`k ch.1 – Dnipropetrovs`k; IMA - pres.- 2006. - 404s. (Rosijs`koyu).
4. Shtepa V.P. Teoriya. Ekspery`ment. Prakty`ka. Energozberezhennya pry` mashy`nnomu vy`robnyc`tvti. Monografiya. – Dnipropetrovs`k: IMA-pres. – 2009. – 268s. (Rosijs`koyu)
5. Vasy`l`yev L.M., Vasy`l`yev D.L., Malich M.G. Samoorganizaciya form rujnuvannya zrazkiv girs`ky`x porid pry` yix sty`skanni: Monografiya. - LAP LAMBERT Academic Publishing.-2021- 243s. (Rosijs`koyu).
6. Vasy`l`yev L.M., Vasy`l`yev D.L., Maly`ch N.G., Angelovsky`j A.A. Mexanika stvorenniya form rujnuvannya zrazkiv girs`ky`x porid: Monografiya.- Dnipro, IMA-pres.-2018-172s. (Rosijs`koyu).
7. M. Malich, L. Vasy`l`yev, D. Vasy`l`yev Ocinka energiyi rujnuvannya zrazkiv girs`ky`x porid pry` asy`mery`chnomu navantazhenni // Ukayins`ky`j girny`chy`j f-2021. Materialy` mizhnarodnoyi konferenciyi – Dnipro.- D.: Nacion-al`ny`j texnichny`j universy`tet «Dn. polit», 2021. –S. 132-139 .
8. M.G. Malich, D.V. Kress, Z.M. Rizo Do py`tannya vy`znachennya kil`kosti energiyi, neobxidnoyi dlya dezintegraciyi girs`ky`x porid do pevnogo rozmiru // Sy`stemni texnologiyi / Regional`ny`j mizhvuzivs`ky`j zbirny`k naukovy`x pracz` – Dnipro, NMetAU #4 (141).- 2022. – S 115-130, MNB: Index Copernicus ISSN –print 1562-9945, ISSN – online 2707-7977, DOI 10.34185/1562-9945-4-141-2022.
9. Malich M.G. Energety`chny`j analiz droblennya rudny`x materialiv asy`metry`chny`m navantazhennyam // Teoriya i prakty`ka metalurgiyi - Dnipro, NMetAU #3. 2022. - С.38-44.
10. M.G. Malich, L.M. Vasy`l`yev, O.O. Usov Doslidzhennya vply`vu parametriv navantazhennya na rozpodil napru-zhen`, shho diyut` pry` rujnuvanni shy`xtovy`x materialiv v drobarkax // Metalurg. ta girny`chorudn. prom-st`. - 2015.-#7.-С.99-106. (Rosijs`koyu).
11. Bedran` N.G. Mashy`ny dlya obogashheny`ya polezny`x y`skopaemy`x / N.G. Bedran`. - K.: Vy`shha shkola, 1980.- 416s.
12. Spravochny`k po obogashheny`yu rud: Specy`al`nye y` vspomogatel`nye processy / O.S. Bogdanov y` dr. – М.: Nedra, 1983.-С.447с.

Надійшла до редколегії / Received by the editorial board: 01.03.2024

Прийнята до друку / Accepted for publication: 20.03.2024

УДК000.000.00.00.00

<https://doi.org/10.34185/tpm.1.2023.04>

Балакін В.Ф., Кадильникова Т.М., Савкін С.В., Балаханова Т.Ю.

Вплив вібрації на мікроструктуру шва зварних труб*Balakin V.F., Kadylnikova T.M., Savkin S.V., Balakhanova T.Yu.***The influence of vibration on the microstructure of the seam of welded pipes**

Анотація. У статті розглядаються результати експериментального дослідження мікроструктури металу зварного шва трубних заготовок, схильних до вібраційної обробки в процесі зварювання. Експериментальне дослідження було поділено на такі етапи: зварювання прямошовних заздалегідь сформованих трубних заготовок із застосуванням вібраційної дії; виготовлення шліфів та вивчення їх мікроструктури в зонах зварного шва; обробка отриманих у процесі експерименту даних. Особливу увагу при вивченні мікроструктури було приділено ділянкам перегріву та нормалізації, як найбільш характеризує якість зварного шва ділянкам зони термічного впливу.

Досліджено тенденцію зміни величини зерна металу зварного шва при різних частотах застосовуваної в процесі зварювання вібрації, а також за її відсутності. Важливе місце у дослідженні було відведено дослідженню ступеня різнозернистості структури, що вивчається.

Ключові слова: Вібраційна обробка, зварний шов, зона термічного впливу, мікроструктура, різнозернистість, трубна заготовка.

Abstract. The article examines the results of an experimental study of the microstructure of the weld metal of pipe blanks subject to vibration processing during the welding process. The experimental study was divided into the following stages: welding of straight-seam preformed pipe blanks using vibration action; production of grindings and study of their microstructure in weld zones; processing of the data obtained during the experiment. Special attention was paid to the areas of overheating and normalization during the study of the microstructure, as the quality of the weld most characterizes the areas of the thermally affected zone.

The trend of changes in the weld metal grain size at different frequencies of the vibration applied in the welding process, as well as in its absence, was studied. An important place in the study was given to the study of the degree of heterogeneity of the studied structure.

Key words: Vibration processing, weld seam, heat-affected zone, microstructure, granularity, pipe billet.

Актуальність. Аналіз стану трубного ринку за останні десятиліття показав, що з боку світових споживачів зварних труб постійно зростають вимоги щодо якості та надійності продукції. Особлива увага в цьому питанні приділяється отриманню зварних труб з поліпшеними показниками міцності, що досягається за допомогою поліпшення якості структури зварного шва.

Постановка проблеми. Крупнозерниста структура металу області зварного шва разом із неоднорідністю структури негативно впливають на фізико-механічні властивості трубного виробу загалом. Проведення відпалу після зварювання електрозварних труб в технологічному процесі, що діє, потрібно не тільки для зняття залишкових напруг, але і для подрібнення структури і підвищення її рівномірності.

Однак будь-які термічні складові технологічного процесу пов'язані з великими матеріальними витратами для підприємства, тривалістю процесу нагрівання за часом, а в деяких випадках і неефективно виконання деяких операцій.

Аналіз публікацій на тему досліджень. Відомі наукові праці [1, 2], в яких наводяться достовірні відомості про позитивний вплив вібрації на подрібнення кристалічної структури злитків зі сталі та сплавів, скорочення або повне усунення зони транскристалізації за рахунок зростання рівноосних кристалів, зниження зональної та дендритної неоднорідності, підвищення механічних та

спеціальних властивостей металів та сплавів.

Також, згідно з відомими дослідженнями [3], вібраційна обробка зварних зразків із низьковуглецевої сталі на режимах, що забезпечують протікання пружно-пластичних деформацій, дозволяє зменшити напруги першого роду, виміряні тензотермічним методом, на 50 – 60%, а при термічній обробці зменшення відбувається на 70 % і більше. Напруги другого роду в зоні сплаву, визначені рентгенівським методом, після вібраційної обробки знижуються на 45%, а після термічної обробки – на 65%.

Однак в описаних вище роботах вібраційна обробка використовувалася стосовно кристалізованого металу зварного шва, в якому вже завершено формування повних залишкових напруг, у той час як у роботах [4-11] доведено позитивний вплив вібрації на розплавлений метал у процесі кристалізації.

Дані дослідження створюють реальні передумови для експериментального дослідження впливу вібраційної обробки в процесі зварювання заготовки трубної на мікроструктуру металу зварного шва.

Метою цього дослідження є виявлення закономірностей зміни величини і рівномірності зерен металу зварного шва в ділянках зони термічного впливу (ЗТВ) при різних частотах вібрації, що застосовується в процесі зварювання, а також при її відсутності.



Балакін В.Ф.
Кадильникова Т.М.
Савкін С.В.
Балаханова Т.Ю.

Balakin V.
Kadylnikova T.
Savkin S.
Balakhanova T.

Виклад основного матеріалу. Дослідження зернової структури зварних зразків проводилося в Інституті чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України у відділі фізико-технічних проблем процесів прокати сортового та спеціального прокату.

Для дослідження мікроструктури були представлені 5 зразків зварних труб, представлені в

таблиці 1. Хімічний склад і технологія виготовлення вихідного гарячекатаного штрипсу однакові, відмінності були лише в умовах зварювання, а саме в частоті вібрації, що застосовується до зразків.

Табл. 1. Зразки дослідження мікроструктури.

Номер зразка	1	2	3	4	5
Частота вібрації, Гц	0	25	50	125	200

Вихідна заготовка отримана на підприємстві ПрАТ «ДМЗ КОМІНМЕТ», формування проводилося в трубоелектрозварювальному цеху №2 за допомогою трубопрофілеелектрозварювального агрегату ТПЕСА 20-114. Як вихідну заготовку для проведення експерименту було обрано сформо-

вану трубну заготовку без нанесення зварного шва, вироблену згідно з ТУ 14-236-15-93 «Труби сталеві електрозварні для побутових потреб». Основні характеристики заготівлі для експерименту представлені у таблиці 2.

Таблиця 2. Характеристики вихідної заготівлі

Параметр	Значення
Зовнішній діаметр, мм	89
Товщина стінки, мм	4
Марка сталі	ЗПС
Номер плавки	1010610

Слід зазначити, що якість зварних швів, виконаних у лабораторних умовах, у загальній масі не відповідало міжнародним стандартам зварних з'єднань, проте цей факт не вплинув на результати дослідження. Однак зіставляти отримані дані з досвідченими режимами зварювання не буде коректно.

Для оцінки впливу режимів зварювання на якість та зміни мікроструктури виготовлено попередні шліфи. Вивчення мікроструктури шліфів проводилося після травлення у 4% спиртовому розчині азотної кислоти (ніталі).

Для зварного з'єднання проводилася класифікація за зонами: зона наплавленого металу, зона термічного впливу та зона основного металу. Зона наплавленого металу являє собою стовпчасті кристаліти, що утворилися з наплавленого металу (розплав основного металу і дроту або

електрода присади), при цьому напрям зростання кристалів завжди збігається з напрямком тепловідведення. Далі слідує зона термічного впливу, що складається з ділянок неповного розплавлення, перегріву та нормалізації.

Вивчення впливу режимів зварювання на мікроструктуру проводилося шляхом оцінки з морфології та кількісних характеристик структурних складових найбільш чутливих та характерних зон – наплавлений метал, перегрів та нормалізації.

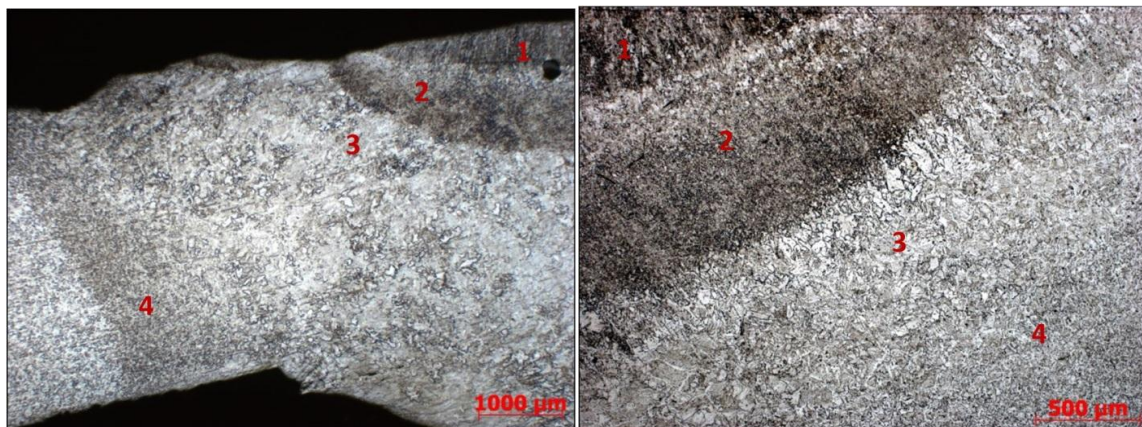
Розміри кристалітів наплавленого металу у всіх зразках мають схожий розмір зерна, тому надалі в роботі докладно не розглядатимуться. Основний метал має класичну ферито-перлітну структуру гарячекатаного металу (рис. 1). Середній розмір зерна фериту становить 17 мкм.



Мал. 1 – Структура гарячекатаної заготовки для виготовлення зварних труб, сталь марки ЗПС

Результати досліджень. Далі будуть проаналізовані кожен із представлених для аналізу зразків. Зразок №1 було отримано без застосу-

вання вібраційної обробки. Зони зварного з'єднання даного зразка наочно представлені малюнку 2.



Мал. 2 – Будова зварного шва, зразок №1: 1 – зона наплавленого металу, 2 – ділянка із наддрібним зерном, 3 – ділянка перегріву, 4 – ділянка нормалізації

Структура з'єднання має характерний вид зварного шва, проте привертає увагу наявність у ділянці, відповідному зоні неповного розплавлення, вкрай дрібнозернистої структури (розмір зерна фериту не перевищує 8 мкм, при цьому середній розмір зерна становить 3,2 мкм), замикає її обрамлення з великих зерен фериту, витягнутих у бік відведення тепла. Наявність феритного обрамлення в структурі зварного шва, як правило, характерна для середньо-і маловуглецевих сталей при правильно виконаних зварювальних роботах. Слід зазначити, що подібна особливість зварного шва виявлена тільки в першому зразку, в інших зразках ділянка наддрібного зерна під шаром металу розплавленого відсутня.

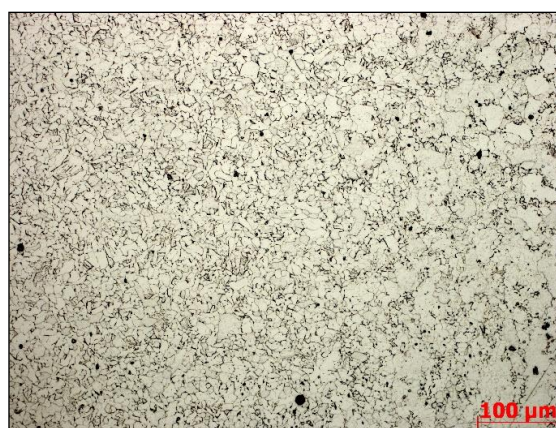
Після феритного обрамлення слід ділянку перегріву, що має вигляд голчастої структури, що

переходить у ділянку нормалізації. Середній розмір пакетів відманштет становить 93 мкм. Бал відманштеттової структури на ділянці перегріву зони термічного впливу зварного шва: 2-3.

Середній розмір нормалізованих зерен становить 8 мкм. Згідно з загальновідомими літературними даними, ділянка нормалізації характеризується найменшим зерном фериту при зварюванні маловуглецевих сталей, проте тут структура помітно більша за розглянуту вище дрібнозернисту структуру. Ступінь різнозернистості ділянці нормалізації зони термічного впливу зварного шва становить 0,44. Характерні фото мікроструктури ділянок перегріву та нормалізації представлені малюнку 3.



а

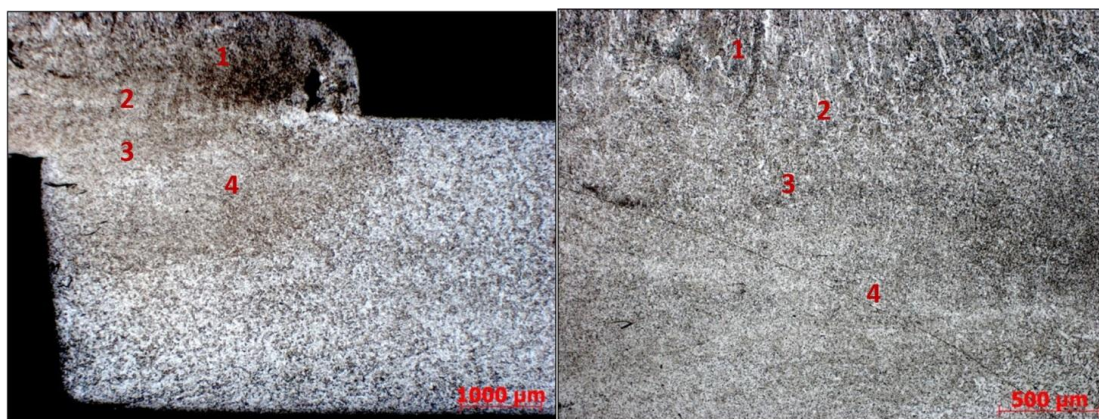


б

Мал. 3 – Структура зварного шва, зразок №1: а – ділянка перегріву, б – ділянка нормалізації

Зразок №2 був отриманий із застосуванням вібраційної обробки частотою 25 Гц. Структурні зони, характерні для будови даного зварного шва наведені малюнку 4. Структура зон зварного шва

характеризується найменшою протяжністю зони термічного впливу порівняно з іншими зразками, представленими для аналізу.



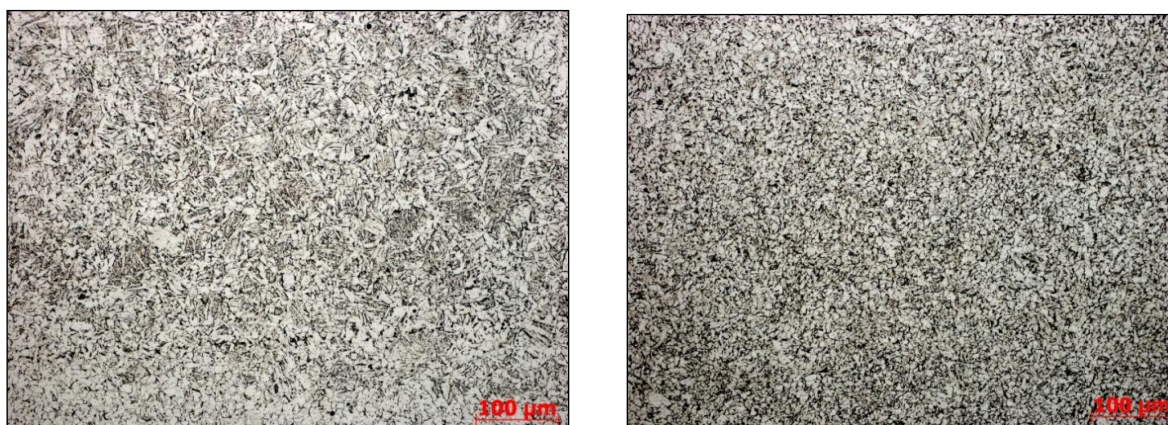
Мал. 4 – Будова зварного шва, зразок №2: 1 – зона наплавленого металу, 2 – ділянка сплавлення, 3 – ділянка перегріву, 4 – ділянка нормалізації.

Кристаліти мають розмір, що відповідає розміру всього наплавленого металу. На ділянці перегріву спостерігається структура відманштету, розмір зерен становить 40 мкм, максимальний розмір не перевищує 57 мкм. Бал видманштеттової структури на ділянці перегріву зони термічного впливу зварного шва: 1-2.

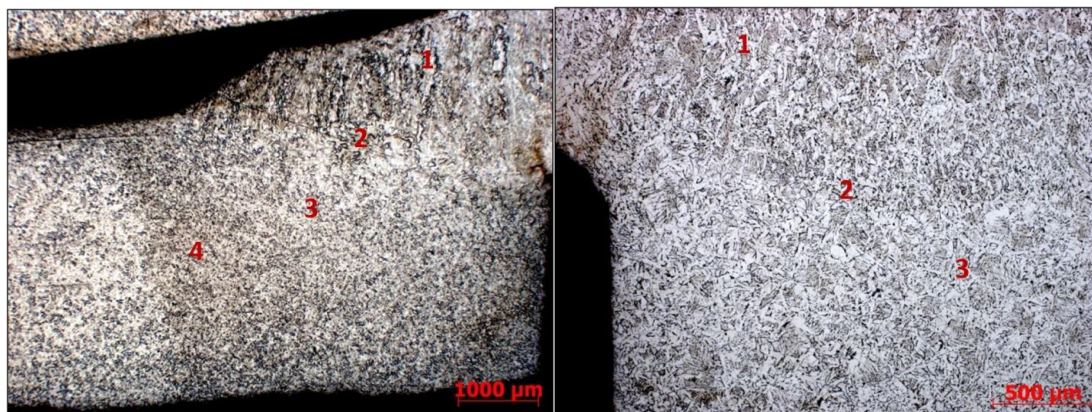
У нормалізованій ділянці відбулося подрібнення гарячекатаної зеренної структури (середній розмір зерна становить 6 мкм). Ступінь різнозернистості у ділянці нормалізації зони термічного

впливу зварного шва становить 0,41. Характерні фото мікроструктури ділянок перегріву та нормалізації представлені малюнку 5.

Зразок №3 був отриманий із застосуванням вібраційної обробки частотою 50 Гц. Характерна мікроструктура у загальному вигляді представлена малюнку 6. Структура зварного шва близька за характеристиками до з'єднання Зразка №2, проте відрізняється дещо більшою протяжністю зони термічного впливу.



Мал. 5 – Структура зварного шва, зразок №2: а – ділянка перегріву, б – ділянка нормалізації



Мал. 6 – Будова зварного шва, зразок №3: 1 – зона наплавленого металу, 2 – ділянка сплавлення, 3 – ділянка перегріву, 4 – ділянка нормалізації.

Зерна видманштетта більша порівняно із зернами зразка №2. Середній розмір зерна на ділянці становить 68,5 мкм. Бал видманштеттової структури на ділянці перегріву зони термічного впливу зварного шва: 2.

У ділянці нормалізації середній розмір зерна фериту становить 11 мкм. Незважаючи на те, що

середній розмір зерен трохи збільшився, структура набула більшої рівномірності. Ступінь різнозернистості у ділянці нормалізації зони термічного впливу зварного шва становить 0,37. Характерні фото мікроструктури ділянок перегріву та нормалізації представлені малюнку 7.



а



б

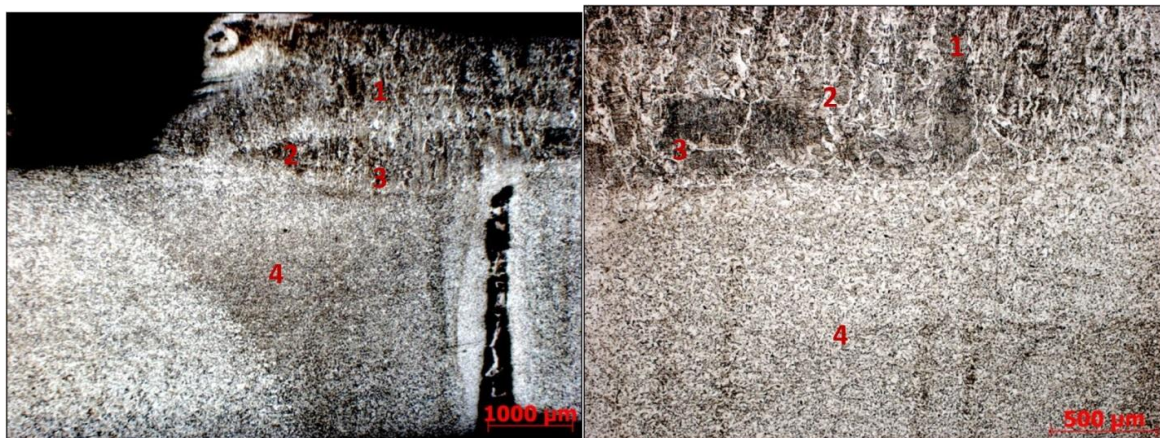
Мал. 7 – Структура зварного шва, зразок №3: а – ділянка перегріву, б – ділянка нормалізації

Зразок №4 був отриманий із застосуванням вібраційної обробки частотою 125 Гц. Цікавим у плані дослідження виявився зразок 4. Зварний шов характеризується малою протяжністю. Ділянка неповного розплавлення практично зливається із ділянкою перегріву. Є великі зерна з видманштеттовою будовою. Зерна оточені чітким феритним обрамленням. Розмір їх вкрай нерівномірний і сягає 395 мкм (середній розмір 125 мкм). При цьому голки видманштетта мають дрібнішу будову в порівнянні з іншими зразками. Бал видманштеттової структури на ділянці перегріву зони термічного впливу зварного шва: 4.

Безпосередньо під аномально великими зернами розташовується дрібнозерниста структура.

Зона нормалізації має невелику протяжність, середній розмір зерна фериту становить 10 мкм. Ступінь різнозернистості у ділянці нормалізації зони термічного впливу зварного шва становить 0,43. Характерні фото загального виду зварного шва представлені малюнку 8. Фото мікроструктури ділянок перегріву і нормалізації представлені малюнку 9.

Зразок №5 був отриманий із застосуванням вібраційної обробки частотою 200 Гц. Зварний шов суцільний, стовпчасті кристали заповнюють весь переріз зони наплавленого металу. Будова зварного шва представлена малюнку 10.



Мал. 8 – Будова зварного шва, зразок №4: 1 – зона наплавленого металу, 2 – ділянка сплавлення, 3 – ділянка перегріву, 4 – ділянка нормалізації

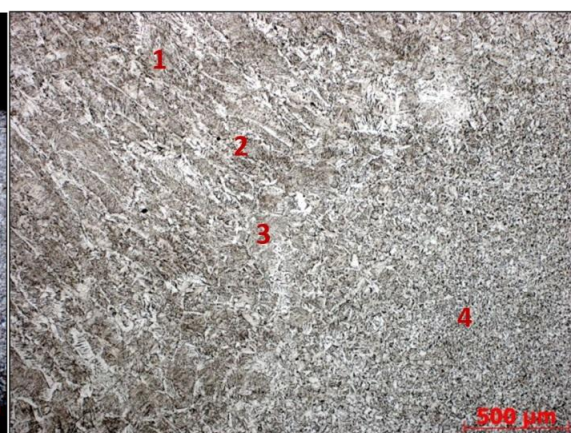
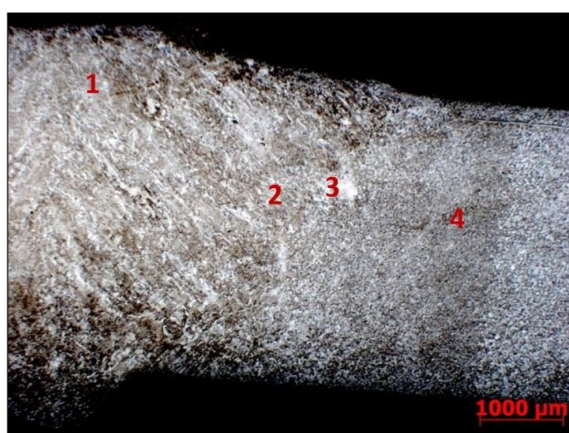


а



б

Мал. 9 – Структура зварного шва, зразок №4: а – перехід від ділянки перегріву до зони нормалізації, б – перехід нормалізованої структури в основний метал



Мал. 10 – Будова зварного шва, зразок №5: 1 – зона наплавленого металу, 2 – ділянка сплавлення, 3 – ділянка перегріву, 4 – ділянка нормалізації

Розмір великих пакетів відманштет становить 120-240 мкм. Бал відманштеттової структури на ділянці перегріву зони термічного впливу зварного шва: 4.

У ділянці нормалізації розмір зерен фериту становить 105 мкм. Ступінь різнозернистості у

ділянці нормалізації зони термічного впливу зварного шва становить 0,49. Характерні фото мікроструктури ділянок перегріву та нормалізації представлені малюнку 11.



а



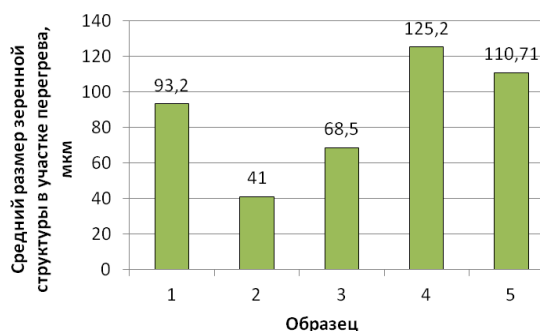
б

Мал. 11 – Структура зварного шва, зразок №5: а – ділянки неповного розплавлення та перегріву, б – перехід нормалізованої структури в основний метал

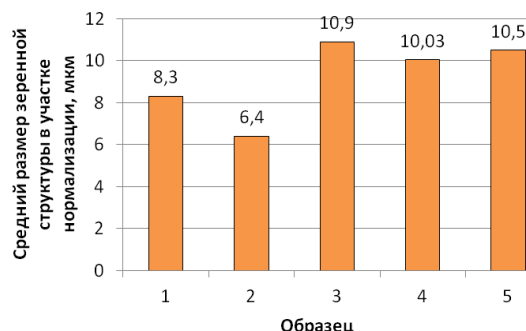
Більш наочно кількісні відмінності структурних складових експериментальних зразків показано малюнку 12.

Як видно на діаграмах, зразок №3 характеризується найменшим розміром зерен металу як у

ділянці перегріву, так і в ділянці нормалізації. Цей факт кореспондується з дослідженнями в галузі застосування вібрації при кристалізації злитків зі сталі та сплавів, наведених вище.



а



б

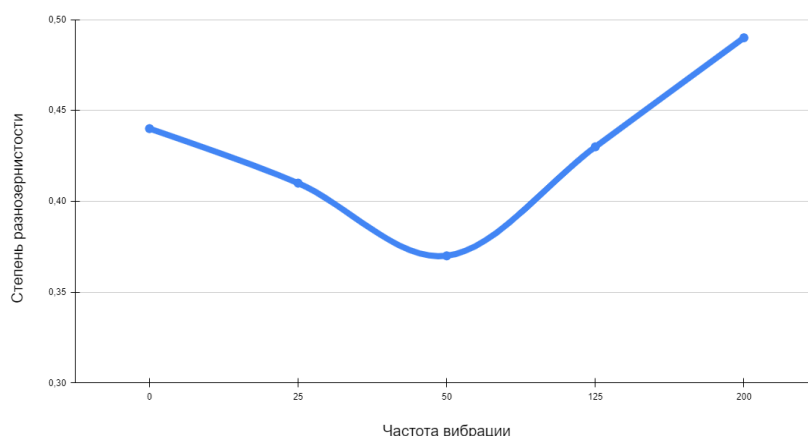
Мал. 12 – Середній розмір зерен характерних ділянок зони термічного впливу в аналізованих зразках: а – ділянка перегріву (структура відманштету), б – ділянка нормалізації (ферито-перлітна структура)

У табл. 3 наведено дані про рівень розвитку відманштеттової структури (згідно з ГОСТ 5640 Сталь. Металографічний метод оцінки мікроструктури листів і стрічки) ділянки перегріву зварних сполук досліджуваних зразків і ступінь різнозернистості ділянки нормалізації.

Ступінь різнозернистості оцінювали за допомогою коефіцієнта варіації (запропонований Салтиковим С. А.), який розраховується як відношення середньоквадратичного відхилення до середнього діаметра зерен. Чим вищий коефіцієнт, тим вища неоднорідність і нерівноосність зерен.

Таблица 3. Дані про різнозернистість структури.

Зразок № п/п	Частота, Гц	Бал відманштеттової структури в ділянці перегріву ЗТВ зварного шва	Ступінь різнозернистості в ділянці нормалізації ЗТВ зварного шва
1	0	2-3	0,44
2	25	1-2	0,41
3	50	2	0,37
4	125	4	0,43
5	200	3	0,49



Мал. 13. Графік залежності рівня різнозернистості структури від застосованої у процесі зварювання частоти вібрації.

Основною чутливою до руйнування зоною зварного шва є зона термічного впливу, а саме ділянка перегріву, внаслідок виникнення в ньому голчастих структур.

Проведення відпалу після зварювання електрозварних труб в технологічному процесі, що діє, потрібно не тільки для зняття залишкових напруг,

але і для подрібнення структури і підвищення її рівномірності.

Чим грубіше структура (у разі, що вищий бал розвитку видманштеттової структури), тим складніше вона усувається за наступної термічної обробці. Рекристалізаційний відпал часто повністю не усуває грубу структуру видманштетта. І у разі усунення спрямованості (гольчастості), у місцях перегріву після відпалу може спостерігатися істотна різнозернистість, яка негативно позначається на властивостях міцності і експлуатаційних зварного виробу. На малюнку 13 наведено графік залежності рівня різнозернистості структури в ділянці нормалізації від застосованої в процесі зварювання частоти вібрації.

Аналізуючи малюнок 13, очевидно, що найбільш однорідна і рівнозерниста структура як у ділянці перегріву, так і в ділянці нормалізації виявлена в зразку №3, звареному з впливом вібрації частотою 50 Гц. Згідно з даними з паралельних досліджень залишкових напруг, зразок №3 так само характеризується найбільшим відсотком зниження залишкових напруг щодо зразка, звареного без застосування вібрації – 71,41%.

Таким чином, можна зробити висновок, що застосування в процесі зварювання вібрації 50 Гц позитивно впливає як на рівень залишкових напруг, так і на рівномірність структури металу. При цьому необхідно відзначити, що при частоті вібрації 25 Гц (Зразок №3), незважаючи на більш

інтенсивне подрібнення зерен, зафіксовано велику різнозернистість та високий рівень залишкової напруги.

Висновки.

Проведені аналітичні дослідження впливу вібрації на мікроструктуру зварного шва показали необхідність проведення експериментальних досліджень, спрямованих на зміну мікроструктури зварного шва безпосередньо в процесі зварювання.

В результаті проведеного експериментального дослідження процесу зварювання на попередньо сформованих трубних заготовках із застосуванням вібраційного впливу встановлено закономірність зміни величини зерен та різнозернистості у ділянках перегріву та нормалізації щодо частоти вібрації.

Дослідження мікроструктури зварних швів показало, що найменша величина зерна зафіксована у зразку, звареному із застосуванням вібрації частотою 25 Гц. Розмір зерна в даному зразку становив 41 мкм у ділянці перегріву та 6,4 мкм у ділянці нормалізації.

Найбільш однорідна та рівнозерниста мікроструктура виявлена у зразку, звареному із застосуванням вібрації частотою 50 Гц. Бал видманштеттової структури в ділянці перегріву ЗТВ зварного шва становив 2 бали. Ступінь різнозернистості у ділянці нормалізації – 0,37.

Бібліографічний опис

1. Мороз Л.С. Механіка та фізика деформацій та руйнування матеріалів.- Л.: Машинобудування, 1984.- 223 с.
2. Горенко В.Г., Русаков П.В. Статичні та динамічні способи зниження рівня залишкових напруг та стабілізації розміру оливок// у кн. - С.23-39.
3. Скаковський В. Д. Розробка технології вібраційної обробки зварних конструкцій рамного типу// Автореферат дисерт. на соіск. вчений. ступеня. - К.: Видавництво ІЕС ім. Е. О. Патона, 1987. - 16 с.
4. Вплив вібрації на кристалізацію органічного зливка / В. Х. Межидов, Х. І. Асхабов, А. С. Ельдарханов, та ін. // Вплив зовнішніх впливів на рідкий метал, що кристалізується. - Київ: ІПЛ АН УРСР, 1983. - С. 35-40.
5. Кристалізація та структуроутворення сталевих зливків в умовах вібраційного впливу / О. Д. Таранов, А.С. Нурадинов, С.Є. Кондратюк та ін. // Процеси лиття. - 1998. - № 3-4. - С. 84-90.
6. Балакін Ю. А., Гладков М. І. Енергоємність зовнішнього впливу на метал, що твердне, з позицій термодинаміки // Изв. вишів. Чер. металургія. - 2001. - № 6. - С. 44-46.
7. Гладков М. І., Балакін Ю. А., Гончаревич І. Ф. Термодинамічний аналіз умов зародження та зростання кристалів при віброобробці металу // Изв. вишів. Чер. металургія. - 1989. - № 9. - С. 27-29.
8. Ефімов В. А., Ельдарханов А. С. Технології сучасної металургії. - М.: Нові технології. - 2004. - 784 с.
9. Поліпшення якості сталі ШХ15 шляхом віброобробки злитків // Сталь. - 1987. - № 4. - С. 48-49.
10. Ельдарханов А.С. Застосування фізичних методів моделювання вивчення впливу вібрації на процеси за твердіння сплавів // Дис. д-ра техн. наук. - Київ, 1996. - 321 с.
11. Балакін Ю. А., Гладков М. І. Розрахунок параметрів вібраційної обробки металів, що кристалізуються // Изв. вишів. Чер. металургія. - 2003. - № 9. - С. 56-60.

Надійшла до редколегії / Received by the editorial board: 01.03.2024

Прийнята до друку / Accepted for publication: 20.03.2024

Сребрянський Г.О., Кривчик Л.С., Хохлова Т.С., Головачов А.М., Підгорний С.М.

Зміцнення трубопресового інструменту для виробництва корозійностійких труб нанесенням покриттів аморфних сплавів

Srebryansky G, Krivchik L, Khokhlova T, Holovachov A, Pidhornyi S
Strengthening of pipe pressing tools for production of corrosion-resistant pipes by application of amorphous alloys

Мета. Створення й обробка високопродуктивних, стійких в експлуатації інструментів для виробництва труб із корозійностійких сталей на трубопресових установках, які могли б протистояти жорстким умовам роботи.

Методика. Аналітичні та експериментальні дослідження в умовах ТОВ ВО «ОСКАР». Мікротвердість зразків отриманих на основі вториннотвердіючих напівтеплостійких сталей мартенситного класу 4Х5МФ1С і 5Х3В3МФС вимірювали на приладі ПМТ-3 на підготовленій поверхні покриття. Для вивчення структурного стану, комплексу фізико-механічних властивостей, фазового складу, стану поверхневого шару інструменту і зразків використовували такі методи дослідження і випробувань: металографічний аналіз виробів і зразків з використанням оптичного металографічного мікроскопу «Axiovert 200 MAT Zeiss»; метод електронної мікроскопії з застосуванням растрового електронного мікроскопу «РЕМ-106І» (прискорювальна напруга 100кВ).

Результати. Внаслідок запропонованої технології підвищуються міцність, зносо- і теплостійкість, а також твердість до $HV_{0,1}$ 980 ÷ 1150 для сталей 5Х3В3МФС (ДИ-23) і $HV_{0,1}$ 860 ÷ 980 для 4Х5МФ1С (в порівнянні із HV 587 – 590 за існуючою технологією термічної обробки в заводських умовах). Також трубний інструмент здобуває високу твердість поверхні, що в комплексі забезпечує роботу інструменту при нагріванні до 600 ÷ 650 °С.

Наукова новизна. В роботі запропонована технологія термозміцнення трубопресового інструмента (матричних кілець складних матриць) горизонтальних пресів зі сталей 4Х5МФ1С і 5Х3В3МФС, яка виключає третій відпуск і використовує нанесення покриття із порошків аморфних сплавів товщиною 100 ÷ 150 мкм.

Практична значущість. Показано, що газоплазмове нанесення покриттів з аморфного сплаву на основі системи Fe – Si – В збільшує твердість поверхні матриць в 1,6 ÷ 2,2 рази і їх стійкість на ~ 40 ÷ 60 %.

Ключові слова: Пресування, інструмент, теплостійкість, легування, покриття, стрічка, зносоустійкість, матриця.

Purpose. Creation and processing of high-performance, durable tools for the production of pipes from corrosion-resistant steels on pipe presses that could withstand harsh working conditions.

Methodology. Analytical and experimental research in the conditions of "OSKAR" LLC. The microhardness of the samples obtained on the basis of secondary hardening semi-heat-resistant steels of the martensitic class 4X5MF1C and 5X3B3MFS was measured on the PMT-3 device on the prepared surface of the coating. To study the structural state, the complex of physical and mechanical properties, phase composition, the state of the surface layer of the tool and samples, the following research and testing methods were used: metallographic analysis of products and samples using an optical metallographic microscope "Axiovert 200 MAT Zeiss"; the method of electron microscopy using the scanning electron microscope "REP-106Y" (accelerating voltage 100kV).

Results. The proposed technology increases strength, wearing and heat resistance, as well as hardness up to $HV_{0,1}$ 980 ÷ 1150 for steels 5X3B3MFS (DI-23) and $HV_{0,1}$ 860 ÷ 980 for 4X5MF1C in comparison with HV 587 ÷ 590 according to the existing technology of heat treatment in the factory). Also the pipe tool acquires high hardness of a surface that provides work of the tool at heating to 600 ÷ 650 °C.

Scientific novelty. The paper proposes a technology for thermal strengthening of tube press tools (matrix rings of complex matrices) of horizontal presses made of 4X5MF1C and 5X3B3MFS steels, which excludes the third temper and uses the application of a coating of amorphous alloy powders with a thickness of 100 ÷ 150 microns.

Practical value. It is shown that gas-plasma application of amorphous alloy coatings based on the Fe - Si - B system increases the hardness of the surface of the matrices in 1.6 ÷ 2.2 times and their stability by ~ 40 ÷ 60 %.

Keywords: Pressing, tool, heat resistance, alloying, coating, tape, wear resistance, matrix.

Вступ. Труби із корозійностійких сталей знаходять широке використання в авіації, ракетобудуванні, атомній енергетиці, суднобудуванні та інших відповідальних галузях промисловості. Їх виготовляють, в основному, методом пресування на трубопрофільних пресах. В процесі виробництва таких труб використовують велику кількість трубного інструменту, вартість якого становить до 25% від

вартості всього технологічного процесу в трубопрокатному цеху. Методом пресування виробляється велика кількість напівфабрикатів, виготовлених з чорних і кольорових металів. Продуктивність прес-установок, якість і вартість готової продукції залежить, значною мірою, від властивостей пресового інструменту [1]. Робочий інструмент працює в умовах високих температур, інтенсивних

© Сребрянський Г.О.
Кривчик Л.С.
Хохлова Т.С.
Головачов А.М.
Підгорний С.М.

Grigory Srebryansky,
Lilia Krivchik,
Tatiana Khokhlova,
Artem Holovachov,
Serhii Pidhornyi

швидкостей ковзання і значного питомого тиску, що зумовлює необхідність використання високолегованих теплостійких інструментальних сталей, які мають підвищену в'язкість і міцність [2]. Умови роботи пресового інструменту характеризуються значними тепловими та силовими навантаженнями на інструмент. При гарячому пресуванні температура нагріву заготовок з різних матеріалів становить від 400 до 1600 °С, а робочі шари інструменту можуть нагріватися до 800°С і вище. Матриця є найбільш навантаженим інструментом, в якому змінюється форма заготовки, тому вона – найбільш зношена частина пресового інструменту. Основні причини руйнування матриць: втрата форми і розмірів каналу, крихке руйнування і розгарні тріщини (рис. 1). Тиск на гравюру матриць досягає

1000 МПа [2]. Умови експлуатації матриці ставлять до її матеріалу такі вимоги: висока теплостійкість, в'язкість, висока розгаростійкість, зносостійкість, жаростійкість, висока теплопровідність [3]. Тому створення високопродуктивного і стійкого в експлуатації трубного інструменту зв'язане, у першу чергу, із одержанням і обробкою таких матеріалів, які могли б протистояти жорстким умовам роботи. Високі механічні властивості інструменту і його теплостійкість (червоність) досягаються спеціальним легуванням і термічною обробкою, але ці методи не завжди дають бажаний результат. Тому певний інтерес представляє вдосконалення і коректування технологій термічної обробки і нанесення спеціальних покриттів для підвищення зносостійкості інструменту.



Рисунок 1. Фото зносу матриці трубопрофільного пресу

Комплекс властивостей, якими повинен володіти пресовий інструмент, досягається використанням при його виготовленні жароміцних сталей аустенітного і мартенситного класів, легованих хромом, вольфрамом, нікелем, молібденом. Для виготовлення матричних кілець збірних матриць горизонтальних трубопрофільних пресів використовують вториннотвердіючі сталі 5Х3В3МФС і 4Х5МФ1С, які піддають термічній обробці [4].

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. При експлуатації інструменту одним з основних видів руйнування є знос (зношування) поверхні. Встановлено, що 85 ÷ 90 % інструменту, що використовується в процесах пресування, виходить з ладу в результаті зносу і тільки 10 ÷ 15 % з інших причин [5].

Знос – процес руйнування і відділення матеріалу з поверхні інструменту і (або) накопичення його залишкової деформації при терті, який проявляється у поступовому змінненні розмірів і (або) форми інструменту (ГОСТ 23002-78). Він пов'язаний з ковзанням заготовки, яка деформується, по

поверхні інструменту при наявності тертя між ними. Як показує практика, стиранню сприяють нормальні і дотичні напруження, що діють спільно або роздільно. При зносі поверхня інструменту набуває нерегулярного поглиблення, що переходить в наступній стадії в сітку тріщин. Дотичні напруження є причиною утворення канавок, що тягнуться вздовж напрямку течії деформованого металу [6].

Основним видом зміцнення трубного інструменту є використання термічної і хіміко-термічної обробки (ХТО). Можна виділити наступні основні напрямки розвитку процесів ХТО:

- розробка ресурсозберігаючих технологій ХТО на основі застосування вакууму, киплячого шару, циклічної обробки в замкнутому просторі, джерел з високою концентрацією енергії (тілючого, дугового розрядів, електронного та лазерного нагріву, СВЧ-технології);

- розробка нових маловідходних технологій отримання композиційних металевих малозносних і корозійностійких покриттів, зокрема осадженням з газової фази [7].

В даний час з технологій такого виду широко застосовуються іонна ХТО в тліючому розряді (іонне азотування, цементация, нітроцементация) і в киплячому шарі (цементация, нітроцементация).

- вакуумна хіміко-термічна обробка: азотування, цементация і нітроцементация в вакуумі. Ці технології значно простіше в апаратному оформленні в порівнянні з обробкою в тліючому розряді. При цьому в 2 ÷ 3 рази зменшується споживання насичуючих газів, створюються умови для регулювання будови дифузійного шару в широких межах [8];

- хіміко-термічна обробка в замкнутому просторі. Вона проводиться шляхом циклічної (імпульсної) подачі компонента в робочий простір печі: азотування, нітроцементация і цементация в замкнутому просторі. Витрата насичуючих газів скорочується в 3 ÷ 10 разів, можливо регулювання будови шару в широких межах [9];

- застосування для ХТО атмосфери на основі повітря і сумішей, що регенерують, які на основі повітря випробувані при азотуванні (при цьому розбавлення аміачної атмосфери до 30-50% повітрям прискорює насичення в 1,5 рази) [10];

- лазерна хіміко-термічна обробка – проводиться в режимі розплавлення поверхні (за рахунок введення легуючих елементів в зону плавлення можна цілеспрямовано змінювати хімічний склад поверхні і обробляти матеріали, які не мають фазових перетворень і мало зміцнюються традиційними методами термічної і хіміко-термічної обробки) [11].

Одним з перспективних напрямків підвищення стійкості інструменту є його зміцнення зносостійкими покриттями. Нанесення покриттів проводять методом конденсації речовини з катодно-іонним бомбардуванням (метод КІБ) на установках «Буллат» і «Пуск», а також методом осадження з газової фази. Методом КІБ наносять різні за складом покриття [12]. Найбільшого поширення набули покриття з нітриду і карбіду титану, рідше застосовуються покриття з нітриду і карбіду молібдену, цирконію, ванадію, ніобію і ін. Методом КІБ не можна зміцнювати внутрішні приховані поверхні. Слід зазначити також високу початкову вартість устаткування і складність його експлуатації [12]. Методом осадження з газової фази наносять покриття з карбідів хрому, титану, ніобію, ванадію, цирконію. Після покриття сталевий інструмент піддається термообробці, яка його зміцнює. Метод відрізняється простотою і невисокою вартістю пристроїв, які застосовують [13].

Також відомі засоби нанесення зносостійких порошкових покриттів на основі нікелю і добавками кремнію, вуглецю та хрому на плазмових установках УПУ-3Д на різні деталі з метою підвищення їх зносостійкості [14], в тому числі наноструктурних [15].

Новий клас металургійних матеріалів – аморфні сплави, які мають високі механічні властивості: високу міцність, твердість та зносостійкість [16].

Найбільш продуктивним і широко розповсюдженим засобом отримання цих матеріалів є загартування із розплаву у вигляді стрічки [17]. Комплекс властивостей цих матеріалів доцільно було б застосувати в якості покриттів, але аморфна стрічка сплавів на основі заліза пластична і з неї важко отримати порошок фракції - 100 мкм. Зазвичай порошки мікрокристалічних і аморфних сплавів виробляють розпиленням розплаву [18]. Цей спосіб найбільш продуктивний і економічний у порівнянні з іншими способами, але він має два недоліки: навіть при розпилюванні інертними газами поверхня частинок порошку містить оксиди, розміри одержаних часток від 3 до 300 мкм, тобто, дуже великий розкид по швидкості охолодження. Оксиди погіршують властивості покриттів деталей і одержаних виробів, а великий розкид розмірів частинок обумовлює анізотропію їх властивостей через різницю швидкостей охолодження [19].

Цих недоліків можна позбутися при отриманні порошків аморфних сплавів розмелом аморфної стрічки [19]. По-перше, швидкості охолодження при розпилюванні розплаву не перевищують $10^3 \div 10^4$ К/с, а при отриманні стрічок або волокон – до $\sim 10^6 \div 10^7$ К/с. Таке збільшення швидкості охолодження при загартуванні розплаву на кілька порядків скорочує час перебування розплаву в рідкому стані, тим самим практично виключаючи окислення поверхні стрічки [19].

По-друге, розміри частинок порошку, одержаного розпиленням, збігається з товщиною аморфних стрічок. Сумарна площа поверхні стрічки буде в ~ 6 разів менше сумарної площі порошкових частинок, що отримуються з однакового об'єму розплаву. При цих умовах охолодження обидві поверхні стрічки практично не встигнуть окислюватися, тому в вихідному матеріалі (стрічці) для отримання аморфного порошку кількість оксидів буде дуже мала, а однорідність аморфної стрічки по товщині ($\pm 1 - 2$ мкм) сприяє однаковій швидкості охолодження всього об'єму розлитого металу [14].

Зносостійкі покриття з аморфних сплавів застосовують на машинобудівних підприємствах, наприклад, при відновленні і зміцненні зношених поверхонь валів і зубчастих коліс, при відновленні колінчастих і розподільних валів, зміцненні головок клапанів транспортних засобів, тощо [18]. В поліпшенні експлуатаційних властивостей високонавантажених деталей і вузлів тертя прокатного і трубопрокатного обладнання зносостійкі покриття, зокрема з аморфних сплавів, не знайшли широкого використання, окрім досліджень, проведених в роботі [20]. Тому проблема використання порошків аморфних сплавів для зміцнення трубного інструменту є недостатньо вивченою, хоча і має широкі перспективи використання і значні переваги.

Мета і завдання дослідження. Традиційна технологія зміцнення термічною і хіміко-термічною обробкою пресового інструменту із вказаних сталей майже вичерпала свої можливості по подальшому підвищенню його експлуатаційних властиво-

стей. Тому метою даного дослідження є удосконалення методів зміцнення основного трубопресового інструменту – матричних кілець складних матриць горизонтальних трубопрофільних пресів для пресування корозійностійких труб, які важко деформуються, шляхом нанесення аморфного покриття для підвищення стійкості в експлуатації.

Матеріали та методи досліджень. Для виготовлення важконавантаженого трубопресового інструменту (матричних кілець збірних матриць горизонтальних трубопрофільних пресів) найчастіше

використовують вториннотвердіючі напівтеплостійкі сталі мартенситного класу 4Х5МФ1С і 5Х3В3МФС, які піддають термічній обробці (загартуванню з відпуском). З метою зміцнення інструменту в роботі запропоновано після загартування з відпуском виконати газоплазмове нанесення на робочу поверхню кілець нанопорошків аморфного сплаву на основі системи Fe-Si-B, товщиною 100 ÷ 150 мкм.

Хімічний склад сталей наведено в таблицях 1 і 2.

Таблиця 1. Хімічний склад сталі 4Х5МФ1С, % по масі (ГОСТ 5950-73) [3]

C	Si	Mn	Cr	V	Mo	Ni	Cu	S	P
0,32	0,90	0,20	4,50	0,30	1,20	Не більше			
0,40	1,20	0,50	5,50	0,50	1,50	0,35	0,30	0,30	0,03

Таблиця 2. Хімічний склад сталі 5Х3В3МФС, % по масі (ГОСТ 5950-73) [3]

C	Si	W	Mn	Cr	V	Mo	Ni	Cu	S	P
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	Не більше			
							0,35	0,30	0,03	0,03

Характерною рисою сталей 4Х5МФ1С і 5Х3В3МФС є комплексне легування і схильність до дисперсійного твердіння. Високий рівень легування сприятливо впливає на міцність, прогартваність, теплостійкість сталі і дає можливість використовувати її для інструментів, що розігріваються в процесі роботи до 600 °С. Дисперсійне твердіння забезпечує гарні деформуючі властивості інструмента [21].

Для проведення досліджень були виготовлені матричні кільця трубопрофільного пресу у кількості 8 (восьми) штук: зі сталі 5Х3В3МФС (ДИ-23) 6 (шість) штук (1 штука діаметром 63,5 мм, 2 штуки діаметром 73,5 мм, 3 штуки діаметром 71,5 мм); зі сталі 4Х5МФ1С 2 (дві) штуки діаметром 71,5 мм і 73,5 мм. Кільця виготовлені на ТОВ «Метінсервіс Груп» (м. Нікополь) і піддані зміцнюючій термічній обробці (ступеневе загартування з 1080 ÷ 1100 °С

та двократному відпуску при 550 ÷ 570 °С (1 відпуск) та 530 ÷ 550 °С (2 відпуск).

Внаслідок низької стійкості матричних кілець (до 5 ÷ 6 пресувань) запропонована удосконалена технологія зміцнення кілець – після загартування з відпуском на робочі поверхні кілець виконали газоплазмове нанесення нанопокриття аморфного сплаву на основі системи Fe-Si-B для отримання шару 0,1 ÷ 0,15 мм і твердістю HV_{0,1} 980-1150.

Стрічку в аморфному стані товщиною від 15 до 100 мкм отримали подачею розплаву на поверхні обертового барабана-кристалізатора в Інституті фізики металів АН України. При такому способі порошується загальна поверхня (у порівнянні із порошком такої самої маси), внаслідок чого практично відсутнє окислення але швидкість охолодження за рахунок підвищення теплопровідності значно вище, і однакова по всій довжині стрічки. Хімічний склад стрічки наведено в таблиці 3.

Таблиця 3. Хімічний склад (вагова доля, %) порошку на основі Ni і Fe

Елемент	Ni	Cr	Si	B	C	Fe	Mo	Co	P
Хімічний склад	9,49	2,1	1,14	1,09	1,46	Інше	7,75	7,15	5,63

Відпал і розмел стрічки були виконані на кафедрі електрометалургії Національної металургійної академії України. Ефективність розмелювання стрічки була забезпечена низькотемпературним відпалом (180 ÷ 200 °С) [22], в процесі якого відбувається так звана структурна релаксація [23, 24], коли аморфний стан зберігається, але стрічка стає крихкою і легко перемелюється у порошок.

Плазмове нанесення порошкового покриття товщиною 100 ÷ 150 мкм на робочі поверхні кілець і

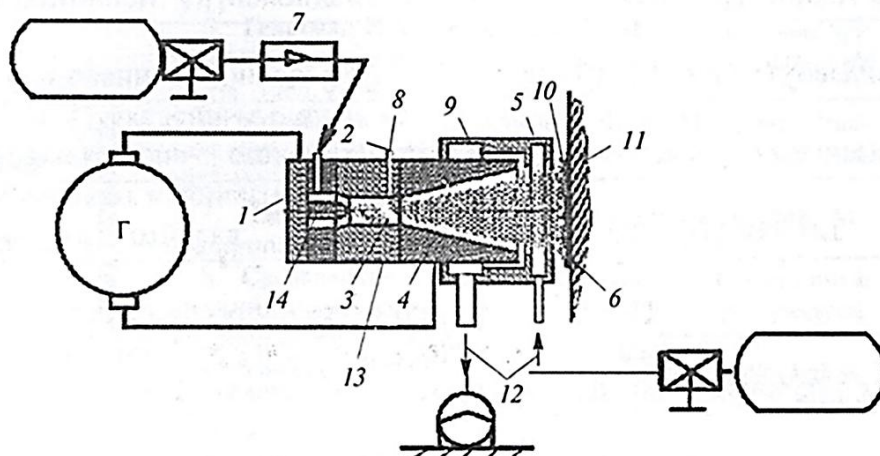
експериментальних зразків вказаних марок сталей виконали на установці УПУ-3Д лабораторії плазмових технологій кафедри матеріалознавства і обробки матеріалів Придніпровської державної Академії будівництва і архітектури.

В газоплазмовій промисловій установці (рис. 2) порошок 8, що напилують, транспортується газом 2, подається перпендикулярно в плазмовий потік 3 і далі через сопло 9 на поверхню інструменту 11, що обробляється. Нагріті стінки насадки 4 з конічною порожниною, яка захищає частки, які напи-

люються від кисню, що міститься в навколишньому середовищі, підвищують швидкість нагрівання частинок, які напильються. Компенсатор 5 на торці сопла 9 усуває тепловий вплив плазмового потоку 3 на покриття 6 і інструмент.

Технологія газоплазмового напильнення полягає в наступному: матеріал, що наноситься на поверх-

хню інструменту, пластифікують нагріванням, розганяють потоком газу і транспортують до поверхні інструменту. При ударі шорсткої поверхні інструменту, частки розплавленого матеріалу впроваджуються в поверхневий шар, утворюючи покриття [20].



1 – плазмотрон з іонізуючим газом; 2 – аморфний порошок; 3 – плазмовий потік; 4 – спеціальна насадка; 5 – компенсатор теплового впливу плазми; 6 – готове покриття на робочій поверхні технологічного інструменту; 7 – іонізуючий газ; 8 – порошок; 9 – сопло; 10 – шар, що напильється; 11 – інструмент; 12 – захисний газ; 13 – анод; 14 – катод.

Рисунок 2. Схема газоплазмового покриття робочої поверхні інструменту преса

Контроль якості напильного покриття проводили візуально за наявністю відшарувань та сколів. Технологічні розміри контролювали за допомогою засобів вимірювання. Мікротвердість зразків вимірювали на приладі ПМТ-3 на підготовленій поверхні покриття [25]. Для вивчення структурного стану, комплексу фізико-механічних властивостей, фазового складу, стану поверхневого шару інструменту і зразків використовували такі методи дослідження і випробувань:

- металографічний аналіз виробів і зразків з використанням оптичного металографічного мікроскопу «Axiovert 200 MAT Zeiss»;
- метод електронної мікроскопії з застосуванням растрового електронного мікроскопу «РЕМ - 106І» (прискорювальна напруга 100кВ) [26].

Результати досліджень. Режими термозміцнення матричних кілець і дослідних зразків наведені в таблиці 4.

В технологічний процес зміцнення матричних кілець для пресування корозійностійких труб нанесенням покриття з аморфного сплаву входили наступні операції:

- виплавка вихідної заготовки аморфного сплаву потрібного складу;
- отримання з заготовки аморфної стрічки;
- низькотемпературний відпал стрічки (180 ± 200 °С);
- розмел крихкої стрічки після відпалу на стандартних млинах;
- стандартне розділення отриманого порошку на фракції;
- безпосереднє нанесення покриття з використанням плазми.

Таблиця 4. Режими термічної обробки інструменту і дослідних зразків

Режим обробки	Температура відпуску, °С			Твердість, HV _{0,1}
	I	II	III	
1 – загартування+відпуск	560 - 580	550 - 560	520 - 530	587 - 590
2 – 5ХЗВЗМФС (ДИ-23) загартування+відпуск+покриття	560 - 580	550 - 560	-	980 - 1145
3 – 4Х5МФ1С загартування +відпуск+покриття	560 - 580	550 - 560	-	860 - 980

Заготовка аморфного сплаву виплавлялась у вакуумній індукційній печі. Потім вона розміщувалась у кварцовому тиглі з соплом в нижній його

часті. В подальшому здійснювали розплавлення заготовки в полі індуктору і подавали в тигель інертний газ під тиском, за рахунок чого із сопла виті-

кав калібрований потік розплаву, який формувався на обертовій поверхні барабану у стрічку. Реалізована швидкість охолодження ($\sim 10^5 \div 10^6$ К/с) забезпечувала аморфний стан стрічки.

Для плазмового напилення поверхні кілець використовували мелений порошок фракцією $50 \div 150$ мкм. Для проведення розсіювання порошоків на фракції застосовували сітки металеві, тканні з квадратними комірками нормальної точності по ГОСТ 6613-86.

Перед застосуванням проводили сушку порошку в сушильній шафі при температурі $150 \div 200$ °С протягом 2 ÷ 3 годин. Порошок сушили на листах з корозійностійкої сталі, періодично перемішуючи. Товщина шару засипки була не більше 20 мм. Просушування дозволяє видалити з порошку адсорбовану вологу, яка є джерелом дифузійного водню, що викликає підвищену пористість і появу тріщин в покритті [27].

Попередня підготовка поверхні кілець полягала в активації поверхні і наданні їй необхідної шорсткості методом пневмо-абразивної обробки електрорундом марки F-16 при тиску 0,5 МПа. Вона обов'язкова і проводиться з метою забезпечення необхідної адгезійної міцності [28].

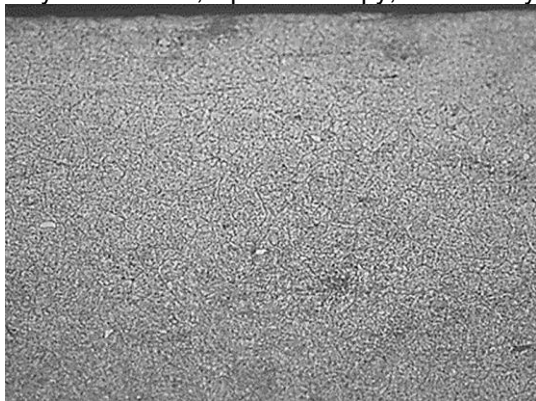
Після пневмо-абразивної обробки кілець, їх обдували сухим стислим повітрям для видалення часток абразиву з поверхні. Оброблена поверхня мала бути матовою, сірого кольору, без блискучих

ділянок. Перерва між пневмо-абразивною обробкою і нанесенням покриттів не повинна перевищувати 2 ÷ 4 години [29].

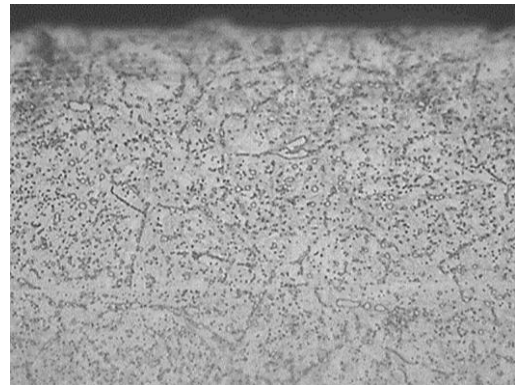
Покриття наносили на універсальній плазмовій установці УПУ-ЗД, призначеній для нанесення зносостійких, фрикційних, ізоляційних і інших спеціальних покриттів на поверхні деталей методом плазмового напилення порошкових матеріалів [30, 31].

Технічні характеристики установки УПУ-ЗД для плазмового напилення:

- витрата плазмоутворюючого газу: аргону – $25 \div 30$ л/хв; азоту – $5 \div 10$ л/хв;
- максимальний струм – 400 А;
- напруга холостого ходу – 160 В;
- фракція порошку, що напилюється – $40 \div 315$ мкм;
- продуктивність напилення – до 2-х кг/год;
- ресурс роботи сопла на технічному азоті – до 140 год;
- витрата води на охолодження плазмотрона – до 7 л/хв;
- тиск води на вході в плазмотрон – не менше 0,2 МПа;
- температура води на виході з плазмотрону – не більше 50°С;
- ККД установки – 60 %;
- рівень шуму при роботі на азоті – 80 дБ.



а



б

Рисунок 3. Мікроструктура поверхні зразків сталі 4X5MФ1C після плазмового нанесення покриттів (оптичні дослідження) : а - $\times 200$; б - $\times 800$

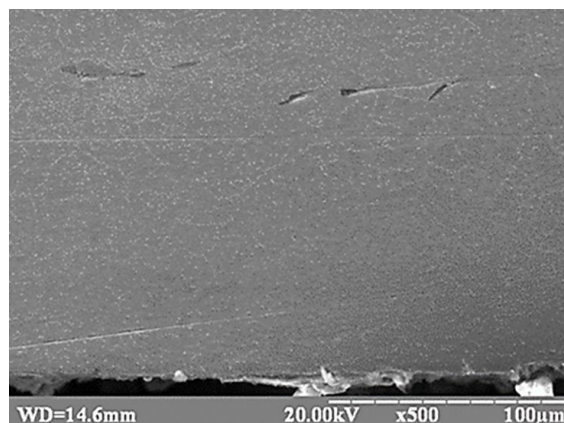
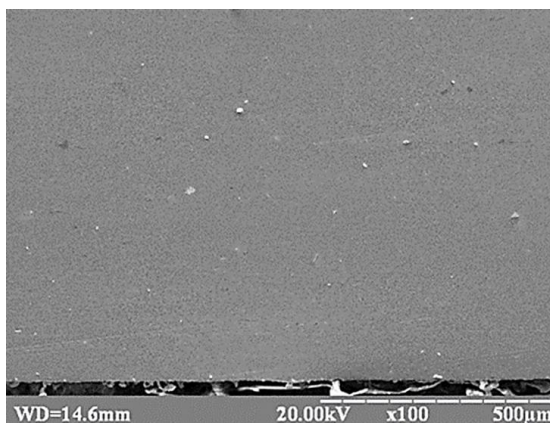


Рисунок 4. Мікроструктура поверхні зразків сталі 4X5MФ1C після плазмового нанесення покриттів (електронне дослідження) : а - $\times 100$; б - $\times 500$

Мікроструктури зразків сталей (оптичні і електронні дослідження) наведені на рис. 3 і 4. На поверхні зразків – покриття аморфного сплаву, а серцевина і перехідний шар – мартенсит відпущений та карбіди хрому, вольфраму, молібдену, ванадію.

Випробування кілець проведено на пресовій дільниці ТОВ ВО «ОСКАР» м. Дніпро на горизонтальному трубопрофільному пресі зусиллям 16 МН показало підвищення їх механічних властивостей. Якщо стійкість матричних кілець після звичайного термозміцнення складає $5 \div 6$ пресувань, то кільця, додатково піддані газоплазмовому нанесенню покриття з аморфного сплаву на основі системи Fe-Si-B показали стійкість $9 \div 10$ пресувань внаслідок більш високої твердості (збільшення твердості в $1,6 \div 2,2$ рази), теплостійкості, зносостійкості.

Висновки. Проведено аналіз літературних даних по засобам підвищення зносостійкості поверхні інструменту, зокрема трубопресового.

Досліджені матричні кільця зі сталей 4Х5МФ1С і 5Х3ВЗМФС, на які наносили покриття з аморфних

сплавів. Запропонована технологія, що включає отримання аморфної стрічки системи Fe-Si-B, пошкоду з неї і нанесення його на поверхню матричних кілець.

Випробування в заводських умовах матричних кілець з нанесеним покриттям показало збільшення їх стійкості на $25 \div 30$ % (з $5 \div 6$ пресувань до $9 \div 10$) в порівнянні з технологією, що використовується на підприємствах та покращення якості внутрішньої поверхні труб.

Запропонована технологія термозміцнення і додаткового нанесення плазмовим напиленням на робочу поверхню кілець нанопокриття із аморфних сплавів товщиною $100 \div 150$ мкм виключає третій відпуск, змінює структуру і властивості поверхневого шару, підвищує міцність, зносостійкість і твердість до $HV_{0,1} 980 \div 1150$ для сталі 5Х3ВЗМФС (ДИ-23) і до $HV_{0,1} 860 \div 980$ для сталі 4Х5МФ1С (в порівнянні з $HV 587-590$ по існуючій технології). В результаті сталь здобуває високу твердість на поверхні, що не змінюється при нагріванні до $600 \div 650$ °С.

Бібліографічний опис

1. Каргин В.Р., Каргин Б.В. Теория и технология прессования, прокатки и волочения: учеб. пос. Самара: Изд-во СГАУ, 2014. – 72 с.
2. Шерба В. Н., Райтбарг Л. Х. Технология прессования металлов: учеб. пос. М.: Металлургия, 1995. – 153 с.
3. Технологии производства нержавеющей труб: сборник лекций / за об. ред. Е.Я. Лезинской; состав. К. М. Бильдин. Никополь: Сентравис, 2019. – 89 с.
4. Смольников Е.А. Термическая и химико-термическая обработка инструментов в соляных ваннах: учеб. пос. М.: Машиностроение, 1989. – 312с.
5. Космацкий Я.И. Исследование процесса износа трубопресового инструмента и разработка технических решений, направленных на повышение его эксплуатационного ресурса: кваліф.робота / за общ. научн. ред. Я.И.Космацкого, Е.В.Королева: Россия, Челябинск, 2017. – 165 с.
6. Semenov M.Yu. Control of the structure of carburized layers of refractory steels, Part 1, «Metallurgy and heat treatment of metals», №5 (695), May 2013 year.
7. Semenov M.Yu. Control of the structure of carburized layers of refractory steels, Part 2, «Metallurgy and heat treatment of metals», №6 (696), June 2013 year.
8. E.V. Korbut "Modern Methods of Surface Hardening of Tools" // Problems of Grating and Construction. - 2010. - VIP. 54.- p. 149 - 153.
9. LG Voroshnin "Prospects for the development of chemical-thermal treatment", "Strengthening technologies and coatings", №1 (37), January 2008, page 5 - 8.
10. Y. Sun, A. Bloyce and T. Bell. Finite element analysis of plastic deformation of various TiN coating/substrate systems under normal contact with a rigid sphere // Thin Solid Films. 1995, v. 271, p. 122 - 131.
11. M. Bader, H.-J. Spies, K. Hock, E. Broszeit, H.-J. Schroder. Properties of duplex treated (gas-nitriding and PVD-TiN, Cr2N) low alloy steel// Surface and Coatings Tecnollogy. 1998, v. 98, p.891-896.
12. T. Bell, H. Dong and Y. Sun. Realising of the potential of duplex surface engineering // Tribology International. 1998, v.31, № 1-3, p.127 - 137.
13. Andre Anders. Handbook of plasma immersion ion implantation and deposition. John Wiley & Sons, inc, 2000.
14. Гельтман И.С. Порошковые материалы для газотермического нанесения покрытий / И.С. Гельтман, Е.М. Рабинович // Сталь. – 1985. - №4. – С. 78 - 81.
15. Панин В.Е. Наноструктурирование поверхностных слоев, нанесение наноструктурных покрытий – эффективный способ упрочнения современных конструкционных и инструментальных материалов / В.Е. Панин, В.П. Сергеев, А.В. Панин // Физика металлов и металловедение. – 2007.-т.104, №6. - С. 650 - 660.
16. Аморфные сплавы. Судзуки К., Фудзимори Х. / Под ред. Масумото Ц. Пер. с япон. – М.: Металлургия. – 1987. – 328 с.
17. Сребрянский Г.А., Стародубцев Ю.Н. Основные принципы совершенствования технологии производства аморфной ленты // Сталь, 1991, № 9. С. 73 - 78.
18. Селиванов М.В., Давыдова Н.М. Микрокристаллические сплавы за рубежом. –Черная металлургия. –1988. - №1. С. 27 - 43.
19. Сребрянский Г.А., Стовпченко А.П. Новый подход к получению порошковых материалов/Materialy V Miedzynarodowa Sasja Naukowa "Nowe Technologie i osiagniecia w metalurgii inzynierii materialowej", (Польша), Politechnica Czestochowska, Wydawnictwo Wipmifs, 2004. P. 618 – 621.

20. Рахманов С. Р. Повышение износостойкости прессового инструмента с помощью покрытий из аморфных сплавов / С.Р. Рахманов, Г.А. Сребрянский, А.Н. Головачев, А.Т. Мамедов, Н.В. Орос // Вестник машиностроения. – 2018. - №1. – С. 55-60.
21. Problem of the synergetic, deformation, wear, and entropy of metallic materials polyanov, metal science and heat treatment, т. 36, выпуск 3-4, С. 148-152. DOI: 10.1007/ BF01398846 опубл. MAR- APR 1994; тип документа: Article.
22. Большаков В.И. Оборудование термических цехов, технологии термической обработки металлопродукции: Учебник. Днепропетровск: Днепр-VAL, 2010. 378 с.
23. Сверхбыстрая закалка жидких сплавов: Сб. научн. трудов. Под ред. Германа Г. Пер. с англ. Жураховского Е.А., Федорова В.В. / Под ред. Борисова В.Т. – М.: Металлургия. – 1986. – 375 с.
24. Кекало И.Б. Атомная структура аморфных сплавов и ее эволюция: Учеб. пособие. – М.: Изд. «Учеба» МИ-СиС. – 2006. – 340 с.
25. А.с. СССР № 1535064. Способ плазменного напыления /Калита В.И., Кудинов В.В., Верниковский Б.К., Коптева О.Г.
26. Кудинов В.В., Калита В.И., Коптева О.Г. Исследование процесса формирования макро- и микроструктуры частиц газотермических покрытий. Физхим, 1992, № 3, С. 88 - 92.
27. Ивлев А.А., Горбатенко Л.А., Калита В.И., Кудинов В.В., Верниковский Б.К. Форма и структура быстрозакаленных порошков на никелевой основе. Порошковая металлургия (Киев), 1990, №8, С. 1 - 5.
28. Savvateev N.N., Pocholok K.V., Kudinov V.V., Kalita V.I., Kopteva O.G. Investigation of amorphous Fe80B20 coatings by the NGR method. International Symposium on nuclear-spectroscopical investigations of hyperfine interactions, USSR, Uzgorod, 1991, p.172. Abstracts.
29. Калита В.И., Кекало И.Б., Комлев Д.И., Тараничев В.Е. Структура и свойства массивных аморфных магнитомягких покрытий, получаемых плазменным напылением. ФММ. т. 80, вып. 2., 1995, С. 35 - 48.
30. Тимофеев В.Н. Калита В.И. Комлев Д.И. Формирование покрытий с аморфной структурой при плазменном напылении. ФХОМ, 1996, №4, С. 47 - 49.
31. Калита В.И., Комлев Д.И. Особенности формирования структуры аморфно-кристаллических покрытий при плазменном напылении. ФХОМ, 1996, №4, С. 43 - 46.

References

1. Kargin V.R., Kargin B.V. Theory and technology of pressing, rolling and drawing: textbook. way. Samara: Izd-vo SSAU, 2014. - 72 p.
2. Sherba V.N., Reitberg L.H. Technology of metal pressing: textbook. way. M.: Metallurgiya, 1995. - 153 p.
3. Technologies for the production of stainless steel pipes: a collection of lectures / for about. ed. Е.Я. Лезинской; composition. KM Bildin. Nikopol: CentraVis, 2019. – 89 p.
4. Smolnikov EA Thermal and chemical-thermal treatment of tools in salt baths: ucheb.pos. M.: Mashinostroyeniye, 1989. – 312 p.
5. Kosmatsky Ya.I. Research of process of wear of the pipe-press tool and development of the technical decisions directed not increase of its operational resource: qualif. Work. / For the general. Science. ed. Я.И.Космачко, Е.В.Королева.: Россия, Челябинск: 2017. – 165 p.
6. Semenov M.Yu. Control of the structure of carburized layers of refractory steels, Part 1, «Metallurgy and heat treatment of metals», №5 (695), May 2013 year.
7. Semenov M.Yu. Control of the structure of carburized layers of refractory steels, Part 2, «Metallurgy and heat treatment of metals», №6 (696), June 2013 year.
8. E.V. Korbut "Modern Methods of Surface Hardening of Tools" // Problems of Grating and Construction. - 2010. - VIP. 54. - P. 149-153.
9. L.G. Voroshnin "Prospects for the development of chemical-thermal treatment", "Strengthening technologies and coatings", №1 (37), January 2008, - P. 5-8.
10. Y. Sun, A. Bloyce and T. Bell. Finite element analysis of plastic deformation of various TiN coating/substrate systems under normal contact with a rigid sphere // Thin Solid Films. 1995, v. 271, - P. 122 - 131.
11. M. Bader, H.-J. Spies, K. Hock, E. Broszeit, H.-J. Schroder. Properties of duplex treated (gas-nitriding and PVD-TiN, Cr2N) low alloy steel// Surface and Coatings Technology. 1998, v. 98, - P. 891-896.
12. T. Bell, H. Dong and Y. Sun. Realising of the potential of duplex surface engineering // Tribology International. 1998, v.31, № 1-3, - P. 127-137.
13. Andre Anders. Handbook of plasma immersion ion implantation and deposition. John Wiley & Sons, inc, 2000.
14. Geltman I.S. Powder materials for gas thermal coating / IS Geltman, E.M. Rabinovich // Steel. - 1985. - №4. - P. 78 - 81.
15. Panin V.E. Nanostructuring of surface layers, application of nanostructured coatings - an effective way to strengthen modern structural and tool materials / V.E. Panin, V.P. Sergeev, A.V. Panin // Physics of Metals and Metallurgy. - 2007.- v.104, №6. - P. 650-660.
16. Amorphous alloys. Suzuki K., Fujimori H. / Ed. Masumoto C. Per. with Japanese. - M.: Metallurgy. - 1987. - 328 p.
17. Srebryansky G.A., Starodubtsev Yu.N. Basic principles of improving the technology of production of amorphous tape // Steel, 1991, № 9. - P. 73 - 78.
18. Selivanov M.V., Davydova N.M. Microcrystalline alloys abroad. - Ferrous metallurgy. -1988-№1. - P. 27-43.
19. Srebryansky G.A., Stovpchenko A.P. A new approach to obtaining powder materials / Materiały V Międzynarodowa Sasja Naukowa "New Technologie i osiągnięcia w metalurgii inżynierii materiałowej", (Poland), Politechnika Czestochowska, Wydawnictwo Wipmifs, 2004. - P. 618 - 621.
20. S.R. Rakhmanov, G.A. Srebryansky, A.N. Golovachev, A.T. Mammadov, N.V. Oros // Increase in wear resistance of the press tool by means of coverings from amorphous alloys // Vestnik mechanical engineering. - 2018. - №1. - P. 55 - 60.

21. Problem of the synergetic, deformation, wear, and entropy of metallic materials polyanov, metal science and heat treatment, vol. 36, issue 3-4, pp. 148-152. DOI: 10.1007 / BF01398846 publ. MAR- APR 1994; document type: Article.
22. Bolshakov V.I. Equipment of thermal shops, technologies of heat treatment of metal products: Textbook. Dnepropetrovsk: Dnepr-VAL, 2010. - 378 p.
23. Ultrafast hardening of liquid alloys: Sat. scientific Trudov. Under the editorship of Herman G. Per. with English Zhurakhovsky E.A., Fedorova V.V. / Ed. Borisova V.T. - M.: Metallurgy. - 1986. - 375 p.
24. Kekalo I.B. Atomic structure of amorphous alloys and its evolution: Textbook. allowance. - M.: Izd. "Study" MISiS. - 2006. - 340 p.
25. A.s. USSR № 1535064. Plasma spraying method / Kalita V.I., Kudinov V.V., Vernikovsky B.K., Kopteva O.G.
26. Kudinov V.V., Kalita V.I., Kopteva O.G. Investigation of the process of formation of macro- and microstructure of particles of gas-thermal coatings. Fizhom, 1992, № 3, - p. 88 - 92.
27. Ivlev A.A., Gorbatenko L.A., Kalita V.I., Kudinov V.V., Vernikovsky B.K. Form and structure of fast-hardened nickel-based powders. Powder Metallurgy (Kiev), 1990, №8, - p. 1 - 5.
28. Savvateev N.N., Pocholok K.V., Kudinov V.V., Kalita V.I., Kopteva O.G. Investigation of amorphous Fe₈₀B₂₀ coatings by the NGR method. International Symposium on nuclear-spectroscopic investigations of hyperfine interactions, USSR, Uzgorod, 1991, - p.172. Abstracts.
29. Kalita V.I., Kekalo I.B., Komlev D.I., Taranichev V.E. Structure and properties of massive amorphous magnetic soft coatings obtained by plasma sputtering. FMM. t.80, issue. 2, 1995, C. 35 - 48.
30. Timofeev V.N. Kalita V.I. Komlev D.I. Formation of coatings with amorphous structure by plasma spraying. FHOM, 1996, №4, - p. 47 - 49.
31. Kalita V.I., Komlev D.I. Peculiarities of the formation of the structure of amorphous-crystalline coatings during plasma sputtering. FHOM, 1996, №4, - p. 43 - 46.

Надійшла до редколегії / Received by the editorial board: 01.03.2024
Прийнята до друку / Accepted for publication: 20.03.2024

Dobrov I.V., Semichev A.V., Pavlenko O.M.

Calculation and analytical method for determining the force parameters of a crank-slider mechanism (massage 2. Kinetostatics)

Добров І.В., Сьомічев А.В., Павленко О.М.

Розрахунково-аналітичний метод визначення силових параметрів кривошипно-повзунного механізму (повідомлення 2. Кінетостатика)

Метою роботи є розробка алгоритму та програми розрахунку енергосилових параметрів кривошипно-повзунного механізму з урахуванням апробованих на практиці та добре зарекомендованих себе: аналітичного методу розрахунку кінематики повзуна та графо-аналітичного методу розрахунку силових параметрів кривошипно-повзунного механізму. Результати досліджень. Розроблено новий метод розрахунку силових параметрів кривошипно-повзунного механізму. Наукова новизна уявляє новий метод розрахунку силових параметрів кривошипно-повзунного механізму, який відрізняється від існуючих методів графо-аналітичних і аналітичних методів використанням нового розрахунково-аналітичного методу визначення лінійних і кутових прискорень кожної з ланок механізму для вирішення кінетостатичних рівнянь механізму в цілому. Практична значимість. Створений алгоритм дозволяє виконати попередню оцінку силових параметрів механізмів та агрегатів з використанням кривошипно-повзунних механізмів на стадії технологічного проектування, техніко-економічного обґрунтування нових агрегатів або модернізації існуючого обладнання при зміні технологічних режимів, пов'язаних з освоєнням випуску сучасної конкурентно спроможної продукції, зокрема для виготовлення безшовних труб на станах холодної прокатки труб роликми.

Ключові слова: кривошипно-повзунний механізм, кінетостатика механізму, силові параметри, алгоритм розрахунку.

The purpose of the work is to develop an algorithm and a program for calculating the power parameters of the crank-slider mechanism, taking into account the proven in practice and well-recommended: analytical method of calculating the kinematics of the slider and the graph-analytical method of calculating the power parameters of the crank-slider mechanism. Research results. The new calculation method and an algorithm for determining the force parameters of the crank-slider mechanism. Scientific novelty. The new method for the analysis of force parameters of a crank-slider mechanism, which differs from the existing methods of graph-analytical and analytical methods by the use of a new calculation-analytical method of determining the linear and angular accelerations of each link of the mechanism for solving the kinetostatic equations of the mechanism as a whole. Practical value. The created algorithm makes it possible to perform a preliminary assessment of the force parameters of mechanisms and aggregates using crank-slider mechanisms at the stage of technological design, technical and economic calculation of new aggregates or modernization of existing equipment when changing technological regimes related with the production of modern competitive products, in particular, for the production of seamless pipes on mills with rollers for cold rolling of pipes.

Key words: crank-slider mechanism, kinetostatics of the mechanism, force parameters, algorithm of calculation.

In message 1, the calculation and analytical method for determining the kinematic parameters of the central crank-slider mechanism (CSM) was developed as a representative of one of the five main types of Assur groups of the 2nd class of the 2nd order [1].

The purpose of this work is to develop an algorithm for calculating the force kinetostatic parameters of the CSM links for the MathCAD application program based on the calculation and analytical method for determining the kinematic parameters of the CSM, taking into account the graphic-analytical method of kinetostatic analysis of mechanisms and machines tested in practice [2-4], which will be the initial data for calculating the strength of parts (links) of the CSM mechanism as part of the operation of high-speed machines and units [1].

Let us consider (Fig. 1) the work of CSM on the example of the operation of a pump [1] containing a crank (link 1 with length $l_1 = l_{OA}$ is represented in Fig. 1, a by the line segment OA), which is movable (using hinges O and A) and it is connected to a fixed base 4 and connecting rod 2 (link with length $l_2 =$

l_{AB} is represented in Fig. 1, a by the line segment AB). Crank 1 rotates uniformly with angular velocity ω_1 (clockwise rotation) relative to the center of the joint O , fixed on a unmovable base 4. The connecting rod 2 performs a plane-parallel motion with the help of a joint B and the rod 2 connected with slider 3, which is located in the fixed horizontal rail of the base 4, and performs a reciprocating motion along the axis OX during crank 1 rotation. In this case, the center of the coordinate system XOY aligned with the center of the axis of rotation of the joint O , and the axis OX is directed in the direction of the working stroke of the slider 3 (along the axis OY), and the slider overcomes external technological resistance P_3 , which is created by the pressure ($p_n = const$) in fluids on slider 3 with the diameter D when it moves in the horizontal guide of the base 4 (Fig. 1, b) in the process of turning the crank 1 at the angle $0 \leq \alpha \leq \pi$ under the action of an external moment M_1 that acts

on the crank 1 from the drive side of the CSM, which is on Fig. 1, *a* is not shown. When the crank 1 turns at an angle $\pi < \alpha < 2\pi$ the slider 3 moves towards the axis OY and idling ($p_n = 0$).

The center of mass m_1 of the crank 1 (with weight $G_1 = m_1g$) is indicated by a dot S_1 . It is located at a distance $l_{OS_1} = 0,5l_{OA}$ from the cylindrical joint O of the crank l_{OA} (line segment OS_1 in Fig. 1, *a*). The center of mass m_2 of the connecting rod 2 (with weight $G_2 = m_2g$) is indicated by a dot S_2 . It is located at a distance $l_{AS_2} = 0,35l_{AB}$ from the cylindrical

joint A of the connecting rod l_{AB} (line segment AS_2 in Fig. 1, *a*). Moments of inertia of the crank 1 and connecting rod 2 relative to the centers of mass S_1 and S_2 are $I_{S_1} = 0,12m_1l_1$, $I_{S_2} = 0,12m_2l_2$. The center of mass of a slider m_3 (with weight $G_3 = m_3g$) is a center of a cylindrical joint B . Friction forces in the cylindrical joints O , A and B as well as between the slider 3 and the base guide 4 are not taken into account in the first approximation.

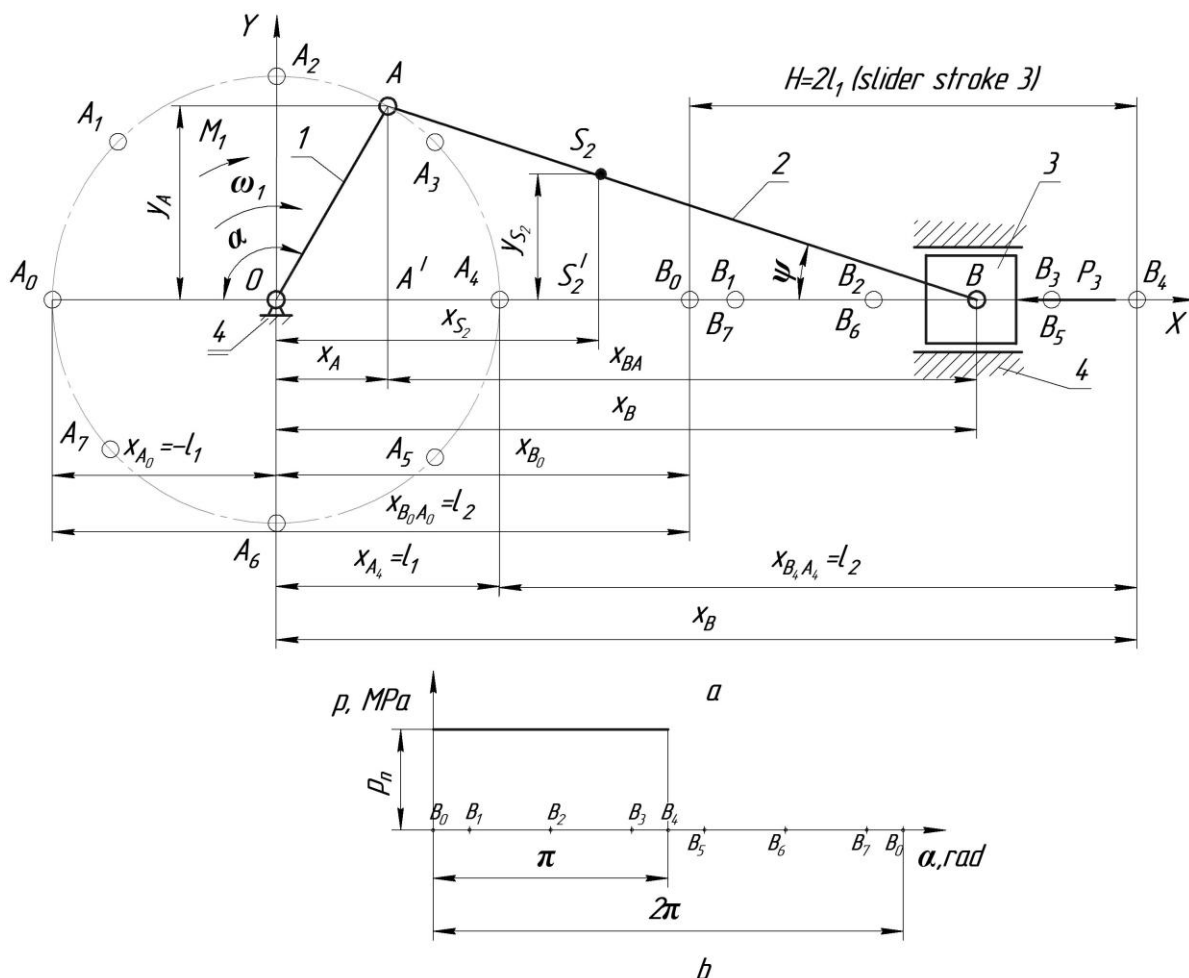


Fig. 1. Scheme of operation of the crank-slider mechanism: *a* – kinematic diagram of CSM; *b* – diagram of slider loading; 3 - during working stroke of CSM

We take as the reference point ($t_0 = 0$) of the current positions of the links 1,2,3 of the CSM mechanism the position of the initial link 1 when the center of the joint A of the crank 1 is in the position of the working stroke point A_0) from among the intermediate positions of the joint A indicated by the points $A_0 - A_1 - A_2 - A_3 - A_4 - \dots - A_7 - A_0$ on the trajectory of the connection rod A along the circle (dash-dotted line in Fig. 1, *a*).

Accordingly, the points $B_0 - B_1 - B_2 - B_3 - B_4 - \dots - B_7 - B_0$ determine the current position of the center of the cylindrical joint B of the slider 3 on the axis OX in the horizontal guide of the base 4 (Fig. 1, *a*), which provide the current positions of the connecting rod 2 (line segments $A_0B_0 = A_1B_1 = A_2B_2 = \dots = A_6B_6 = A_7B_7 = A_0B_0$ in Fig. 1 are not shown). At the same time points $B_0 - B_1 - B_2 - B_3 - B_4$ determine the current position of the slider during its working stroke, (Fig. 1: *a, b*) at which technologi-

cal force caused by the injected fluid acts on the slider 3 in accordance with diagram of loading (Fig. 1, b)

$$P_3 = p_n S_3 = p_n \frac{D^2}{4}, \quad (1)$$

where p_n - the nominal working pressure that the pump creates; S_3 - area of the end surface of the slider 3 with the diameter D .

In its turn, the points $B_4 - B_5 - B_6 - B_7 - B_0$ in Fig. 1: a, b: a, b determine the current position of the slider 3 when it is idling ($p_n = 0$) in the process of the reciprocating movement of the slider.

The current position of the crank cylindrical joint A of the crank 1 (points A in Fig. 1, a) in the process of its uniform rotation ($\omega_1 = \text{const}$) relative to the initial position (points A_0) is determined by the angle

$$\alpha = \omega_1 t_1, \quad (2)$$

where $t_1 > t_0$ the time of rotation of the crank 1 at an angle α relative to the initial position of the crank (line segment OA_0 in Fig. 1, a), which is determined by the coordinates of the point A_0 at $t_1 \leq T$ - crank rotation period:

$$\begin{cases} x_{A0} = -l_1 \cos \alpha_0 = -l_1 \cos(\omega_1 t_0) = -l_1; \\ y_{A0} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Slider coordinates 3 in this position of CSM (point B_0 in Fig. 1, a) will be [1]:

$$\begin{cases} x_{B0} = x_{A0} + l_2 = -l_1 + l_2 = l_2 - l_1; \\ y_{B0} = 0. \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} x_B = OA' + A'B = x_A + x_{BA} = x_A + AB \cos \psi = -l_1 \cos \alpha + l_2 \cos \psi; \\ y_B = 0, \end{cases} \quad (10)$$

where ψ - the current angle that determines the inclination of the connecting rod (the line segment AB in Fig. 1, a) to the axis OX .

From right triangles $OA'A$ and $BA'A$ it follows

$$\cos \psi = \sqrt{1 - (\sin \psi)^2} = \sqrt{1 - \left(\frac{l_1}{l_2} \sin \alpha\right)^2} = \sqrt{1 - \lambda^2 (\sin \alpha)^2} \approx 1 - 0,5\lambda^2 (\sin \alpha)^2, \quad (12)$$

$$\text{where } \lambda = \frac{l_1}{l_2} \text{ and } (\lambda \sin \alpha)^2 \ll 1.$$

Let's substitute (12) into the first equation of the system of equations (10) and determine the current coordinates of the joint B of the slider 3 on the axis OX at the current position of the initial link 1:

$$\begin{cases} x_B = l_2 \sqrt{1 - \lambda^2 (\sin \alpha)^2} - l_1 \cos \alpha \approx l_2 (1 - 0,5\lambda^2 (\sin \alpha)^2) - l_1 \cos \alpha = l_1 \left[\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{\lambda}{4}\right) \cos \alpha + \frac{\lambda}{4} \cos 2\alpha \right]; \\ y_B = 0. \end{cases} \quad (13)$$

From the analysis of right-angled triangles $AA'A'B$ and $\Delta S_2 S_2' B$ (Fig. 1, a) the determination of the coordinates of the current position of the center of mass m_2 (point S_2) of the connecting rod 2 follows

$$\begin{cases} x_{S2} = OA' + A'S_2' = OA' + \frac{A'B}{AB} AS_2 = x_A + \frac{x_{AB}}{l_2} l_{AS_2} = x_A + \frac{x_B - x_A}{l_2} l_{AS_2}; \\ y_{S2} = \frac{OA}{AB} S_2 B = y_A \frac{l_2 - l_{AS_2}}{l_1}. \end{cases} \quad (14)$$

The current values of the projections of accelerations ($a_{A,x}, a_{A,y}$) of the crank joint and the projections of acceleration ($a_{B,x}, a_{B,y}$) of the joint B of the slider 3 (Fig. 2) will be determined at

When crank 1 angle is $\alpha = 0,5\omega_1 T = \pi$ then the point of cylindrical joint A on the trajectory of its movement will take the extreme position along the axis OX and will be located on the circle at the point A_4 with coordinates:

$$\begin{cases} x_{A4} = -l_1 \cos(\pi) = l_1; \\ y_{A4} = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Accordingly, the extreme position of the slider 3 at the end of the work stroke determines the coordinate of the point B_4 on the axis OX if $y_{B4} = 0$.

$$x_{B4} = x_{A4} + l_2 = l_1 + l_2. \quad (6)$$

In this case stroke (H) of the slider 3 will be

$$H = x_{B4} - x_{B0} = l_1 + l_2 - (l_2 - l_1) = 2l_1. \quad (7)$$

In the current position of the crank 1, the coordinates of the point A (the center of the crank joint A) are

$$\begin{cases} x_A = -l_1 \cos \alpha; \\ y_A = l_1 \sin \alpha. \end{cases} \quad (8)$$

From the analysis of right-angled triangles $\Delta OA'A$ and $\Delta OS_1'S_1$ (Fig. 1, a) the determination of the coordinates of the current position of the center of mass m_1 (point S_1) of the crank 1 follows:

$$\begin{cases} x_{S1} = x_A \frac{l_{OS_1}}{l_{OA}} = 0,5x_A; \\ y_{S1} = y_A \frac{l_{OS_1}}{l_{OA}} = 0,5y_A. \end{cases} \quad (9)$$

In its turn, the coordinates of the current position of the slider 3 (points B in Fig. 1, a) along the fixed horizontal guides 4 (axis OX) will be [1-4]:

$$l_1 \sin \alpha = y_A = A'A = l_2 \sin \psi.$$

Then

$$\sin \psi = \frac{l_1}{l_2} \sin \alpha = \lambda \sin \alpha. \quad (11)$$

The equation (11) is converted to equation

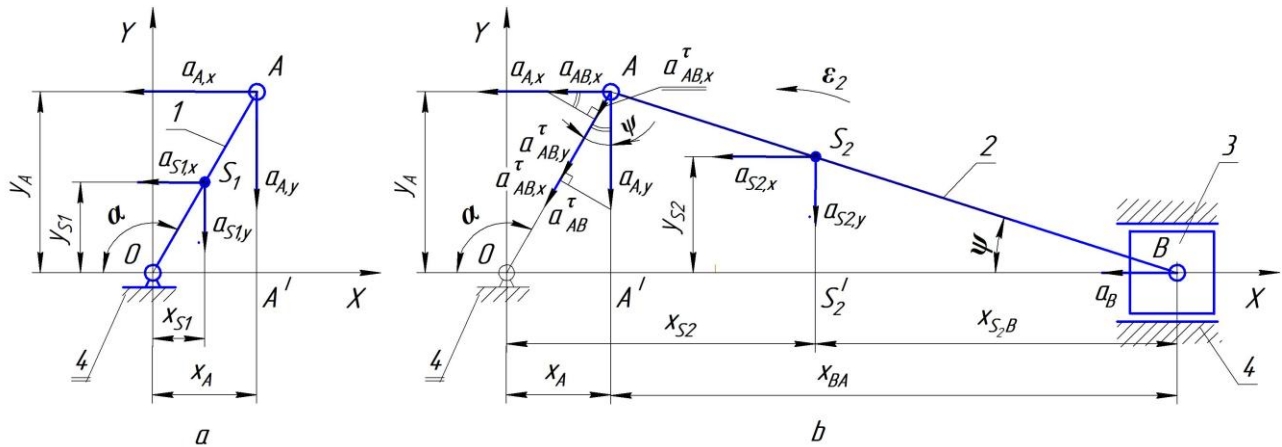


Fig. 2. The distribution of the current values of the projections of the accelerations of the links of the CSM: a - the link 1 (crank); b – links 2 (connecting rod) and 3 (slider) of the Assur group

successive differentiation of the system of equations (8) and (13).

$$\begin{cases} a_{A,x} = \frac{d^2 x_A}{dt^2} = \frac{d^2 x_A}{d\alpha^2} \frac{d\alpha^2}{dt^2} = l_1 \omega_1^2 \sin \alpha, \\ a_{A,y} = \frac{d^2 y_A}{dt^2} = \frac{d^2 y_A}{d\alpha^2} \frac{d\alpha^2}{dt^2} = l_1 \omega_1^2 \cos \alpha. \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} a_{B,x} = a_B = \frac{d^2 x_B}{dt^2} = \frac{d^2 x_B}{d\alpha^2} \frac{d\alpha^2}{dt^2} = -l_1 \omega_1^2 (\cos \alpha - \lambda \cos 2\alpha); \\ a_{B,y} = 0. \end{cases} \quad (16)$$

The values of the current values of the projections ($a_{S1,x}$, $a_{S1,y}$) of the acceleration of the center of mass m_1 (points S_1) of the crank 1 are determined (Fig. 2, a) from the similarity of right triangles $\Delta OA'A$ and $\Delta OS_1'S_1$. Then:

$$\begin{cases} a_{S1,x} = a_{A,x} \frac{l_{OS1}}{l_{OA}} = 0,5 a_{A,x}; \\ a_{S1,y} = a_{A,y} \frac{l_{OS1}}{l_{OA}} = 0,5 a_{A,y}. \end{cases} \quad (17)$$

The values of the current values of the projection ($a_{S2,x}$, $a_{S2,y}$) of the acceleration of the center of mass m_2 (point S_2) of the connecting rod 2 are determined (Fig. 2, b) from the similarity of right triangles $\Delta AA'B$ and $\Delta S_2S_2'B$ [1]. Then:

$$\begin{cases} a_{S2,x} = a_{A,x} + \frac{a_B - a_{A,x}}{l_2} l_{AS2}; \\ a_{S2,y} = a_{A,y} \frac{l_{AS2}}{l_2}. \end{cases} \quad (18)$$

In this case (Fig. 2, b), the direction of the relative tangential acceleration (a_{AB}^τ) of the joint A relative to the joint B of the connecting rod 2 and, accordingly, the magnitude and direction of the angular acceleration (ε_2) of the connecting rod 2 is determined by the system of equations:

$$\begin{cases} a_{AB}^\tau = (a_{A,x} - a_B) \sin(\psi) + a_{A,y} \cos(\psi); \\ \varepsilon_2 = \frac{a_{AB}^\tau}{l_{AB}}. \end{cases} \quad (19)$$

From (15) - (18) the determination of the current values follows: projections ($P_{i2,x}$, $P_{i2,y}$) of the connecting rod 2 inertia force P_{i2} at the point S_2 and

the moment M_{i2} of the connecting rod inertia force (M_{i2}); slider 3 inertia forces P_{i3} at a point B (Fig. 3, a); projections ($P_{i1,x}$, $P_{i1,y}$) of the crank inertia force P_{i1} at the point S_1 (Fig. 3, b) and the moment of the crank 1 inertia force ($M_{i1} = 0$ at $\omega_1 = \text{const}$):

$$\begin{cases} P_{i2,x} = -m_2 a_{S2,x}; \\ P_{i2,y} = -m_2 a_{S2,y}; \\ M_{i2} = -I_{S2} \varepsilon_2; \\ P_{i3,x} = P_{i3} = -m_3 a_B; \\ P_{i1,x} = -m_1 a_{S1,x}; \\ P_{i1,y} = -m_1 a_{S1,y}. \end{cases} \quad (20)$$

When comparing the design scheme (Fig. 3, a) of the kinetostatic equilibrium of the Assur group, including links 2, 3 and kinematic connections between the crank 1 and the connecting rod 2 in the joint A, between the connecting rod 2 and the slider 3 in the joint B, as well as between the slider 3 and the horizontal guide of the base 4 in the translational kinematic pair, providing the current position of the links 2 and 3 the CSM in the coordinate system XOY , the kinematic links are conditionally replaced by [2-4] the action of forces ($P_{21,x}$, $P_{21,y}$) of the force P_{21} on the connecting rod 2 from the side of the crank 1 in the joint A and the action of force ($P_{34} = P_{34,y}$) on the slider 3 from the side of the base guide 4 directed perpendicular to the flat surface of the slider 3 (along the axis OY in the absence of friction sliding between the slider 3 and the guide 4 ($P_{34,x} = 0$)).

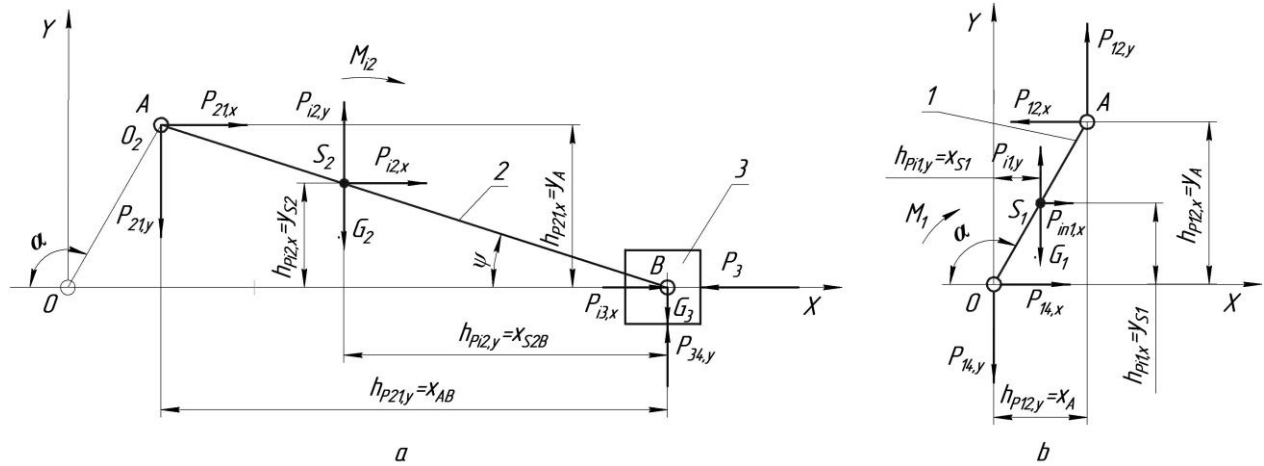


Fig. 3. Calculation scheme of kinetostatic equilibrium during the working stroke of the CSM:
a - Assur group containing links 2 (rod) and 3 (slider); b - leading link (crank 1) CSM

Thus, the condition of kinetostatic equilibrium of the links 2 and 3 (Fig. 3, a) in the coordinate system is determined by the system \$XOY\$ of equations:

$$\begin{cases} \Sigma X = P_{21x} + P_{i2x} - P_3 + P_{i3x} = 0; \\ \Sigma Y = -P_{21y} + P_{i2y} + P_{34y} - G_2 - G_3 = 0; \\ \Sigma M_B = P_{21x}h_{p21,x} + P_{i2,x}h_{pi2,x} + (P_{i2,y} - G_2)h_{pi2,y} + M_{i2} - P_{21,y}h_{p21,y} = 0, \end{cases} \quad (21).$$

where \$\Sigma X\$ and \$\Sigma Y\$ - respectively, the the sum of the projection of forces on the coordinate axes \$OX\$ and \$OY\$; \$\Sigma M_B\$ - the sum of moments of forces and moment of inertia \$M_{i2}\$ relative to the center of the joint \$B\$; \$h_{p21,x} = y_A\$, \$h_{pi2,x} = y_{S2}\$, \$h_{pi2,y} = x_{S2B}\$, \$h_{p21y} = x_{AB}\$ respectively lever arms of forces \$P_{21,x}\$

, \$P_{i2,x}\$, \$P_{i2,y}\$ and \$G_2\$, \$P_{21,y}\$ relative to the center of the joint \$B\$.

From the system of equations (21), the determination of the kinetostatic loading of the connecting rod 2 and the slider 3 (Assurian group 2, 3) follows, in the coordinate system \$XOY\$:

$$\begin{cases} P_{21x} = P_3 - P_{i2,x} - P_{i3,x}; \\ P_{21y} = \frac{P_{21,x}h_{p21,x} + P_{i2,x}h_{pi2,x} + (P_{21,y} - G_2)h_{pi2,y} + M_{i2}}{h_{p21,y}}; \\ P_{34,y} = P_{21,y} - P_{i2,y} + G_2 + G_3. \end{cases} \quad (22)$$

In its turn, on the basis of Newton's third law, the components \$P_{12,x} = -P_{21,x}\$ and \$P_{12,y} = -P_{21,y}\$ acting in the current position of the working stroke of the CSM on the crank 1 from the side of the connecting rod 2 in the joint \$A\$ (Fig. 3, b), which, together with the components \$P_{14,x}\$ and \$P_{14,y}\$ acting on the crank from the side of the base in the joint \$O\$; components

\$P_{i1,x}\$, \$P_{i1,y}\$ and gravity \$G_1\$ provide conditions for uniform rotation of the crank 1 with angular velocity \$\omega_1\$ due to external moment \$M_1\$ during the working stroke (\$M_1(\alpha) = M_{ws}(\alpha)\$ at \$\pi \le \alpha \le \pi\$).

The equilibrium condition for link 1 (Fig. 3, b) in the coordinate system \$XOY\$ is determined by the system of equations:

$$\begin{cases} \Sigma X = -P_{12,x} + P_{14,x} + P_{i1,x} = 0; \\ \Sigma Y = P_{12,y} - P_{14,y} - G_1 + P_{u1,y} = 0; \\ \Sigma M_O = M_1 - P_{12,x}h_{p12,x} - P_{12,y}h_{pi12,y} + P_{i1,x}h_{pi1,x} - (P_{i1,y} - G_1)h_{pi1,y} = 0, \end{cases} \quad (23)$$

where \$\Sigma M_O\$ - the torques sum of the \$P_{12,x}\$, \$P_{12,y}\$, \$P_{i1,x}\$, \$P_{i1,y}\$, \$G_1\$ and moment \$M_1\$ relative to the center of the joint \$O\$; \$h_{p12,x} = y_A\$, \$h_{p12,y} = x_A\$, \$h_{pi1,x} = 0.5y_A\$, \$h_{pi1,y} = 0.5x_A\$ - respectively lever arms of forces \$P_{12,x}\$, \$P_{12,y}\$, \$P_{i1,x}\$, \$P_{i1,y}\$ and \$G_1\$, relative to the center of the joint \$O\$.

From (26):

$$\begin{cases} P_{14,x} = P_{12,x} - P_{i1,x}; \\ P_{14,y} = P_{12,y} + P_{i1,y} - G_1; \\ M_1 = P_{12,x}h_{p12,x} + P_{12,y}h_{pi12,y} - P_{i1,x}h_{pi1,x} + (P_{i1,y} - G_1)h_{pi1,y}. \end{cases} \quad (27)$$

In the kinetostatic calculation of the CSM in the process of idling (\$M_1(\alpha) = M_{id}(\alpha_1)\$) (during turning

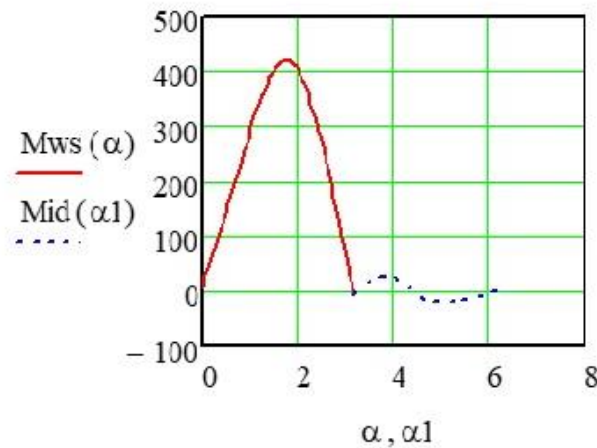
the crank at an angle \$\pi \le \alpha = \alpha_1 \le 2\pi\$), it is necessary to accept in equation (1) \$p_n = 0\$ and, accord-

ingly, in the equations of the systems of equations (21), (22) accept $P_3 = 0$ and all other design equations (3) - (20) and (23), (24) remain unchanged.

Below (Fig. 4) are the results of change in kinetostatic moment $M_1(\alpha)$, for one revolution of the crank, calculated in accordance with the developed

method using the MathCAD application for the following initial data:

$l_1 = 0,1\text{m}$; $l_2 = 0,285\text{ m}$; $l_{AS_1} = 0,05\text{m}$; $l_{AS_2} = 0,1\text{m}$; $m_1 = 2,8\text{kg}$; $m_2 = 3,6\text{kg}$; $I_1 = 0,342 \cdot 10^{-2}\text{kg}\cdot\text{m}^2$; $I_2 = 0,7 \cdot 10^{-1}\text{kg}\cdot\text{m}^2$; $\omega_1 = 29,3\text{s}^{-1}$; $p = 29,3\text{s}^{-1}$; $p = 0,35\text{ MPa}$; $D = 0,12\text{m}$.



$M_{ws}(\alpha)$ [Nm] - moment on the crank during the working stroke ($0 \leq \alpha \leq \pi$),

$M_{id}(\alpha_1)$ [Nm] - moment on the crank during idling ($\pi \leq \alpha_1 \leq 2\pi$).

Fig. 4. Graph of the change in the kinetostatic moment of the leading link (crank 1) CSM:

Conclusions. The new calculation method and algorithm for determining the kinetostatic parameters of the CSM for personal computers using standard MathCAD applications was developed, which allows you to expand the possibilities of studying the reliable

operation of the CSM as a part of various machines and units by clarifying the power parameters of the CSM depending on the technological load, dimensions and configuration of parts. and connections.

References

1. Dobrov I.V. Calculation and analytical method for determining the force parameters of a crank-slider mechanism (Massage 1. Kinematics) / I.V. Dobrov, A.V. Somichev // Theory and practice of metallurgy - 2022. - №5. - pp.16-21.
2. Kozhevnikov S.N. Theory of mechanisms and machines / S.N. Kozhevnikov - M.: Mashinostroenie, 1973. - 592 p.
3. Artobolevsky I.I. Theory of mechanisms and machines / I.I. Artobolevsky - M.: Nauka, 1975. - 640 p.
4. Ozol O.G. Theory of mechanisms and machines / O.G. Ozol - M. Nauka, main edition of physical and mathematical literature, 1984. - 432 p.

Надійшла до редколегії / Received by the editorial board: 01.03.2024
Прийнята до друку / Accepted for publication: 20.03.2024

Назюта Л.Ю., Степаненко Д.В.

Декарбонізація енергетики Китаю. Копалини теплоносії.

Nayuta L., Stepanenko D.

Decarbonization of china's energy sector. Fossil fuels as heat carriers.

В огляді розглядаються особливості декарбонізації енергетики Китаю та його потенційний вплив на вирішення проблем. Також може бути корисним при розробці стратегії декарбонізації економіки та відновлення енергетичного потенціалу України.

Показано, що Китай лідирує за емісією в атмосферу землі парникових газів (близько 30% глобальних викидів вуглекислого газу у світі порівняно з 10.7% 1990 року).

Під впливом міжнародних організацій Китай приймає низку програм з декарбонізації своєї економіки, а 2020 року оголошує про намір досягти вуглецевої нейтральності до 2060 року. Прийнята програма декарбонізації китайської економіки коштуватиме країні понад 5 трлн. міжнародних доларів. Тому компроміс між захистом довкілля та економічним зростанням є найбільшою проблемою для Китаю.

Причиною високої емісії парникових газів у Китаї – це структура національної економіки та промисловості, яка орієнтована на застосування викопних вуглеводнів. Тому Китаю слід оптимізувати структуру експорту своєї продукції та імпорту сировинних матеріалів. Найбільш енергоємні виробництва (чорних та кольорових металів) частково перенести до інших країн. Основну увагу слід приділяти виробництву товарів з мінімальною енергоємністю та високою часткою ПДВ.

За сумарними запасами енергоносіїв Китай посідає третє місце у світі, поступаючись США та Росії. Нині китайська економіка споживає близько 20% світового споживання енергоносіїв. У структурі енергоносіїв вугілля становить майже 60% і майже вдвічі перевищує середньосвітовий рівень. Зниження залежності економіки від вугілля стане однією з головних складових, з якими зіткнеться країна у боротьбі зі зміною клімату.

Показано, що, незважаючи на раніше прийняті зобов'язання щодо скорочення вугільної енергетики, Китай не готовий повністю відмовитися від використання вугілля. Однак, в умовах енергетичної кризи та наявності власних запасів вугілля (141,6 млрд т або 13,24% від світових запасів), Китай має, не знижуючи обсягів власного вироблення та імпорту природного газу та нафти (понад 40% потреби), особлива увага приділяти технологіям дегазації вугілля, а також уловлювання, зберігання та використання CO₂ (CCS - carbon capture and storage) на всіх етапах промислового виробництва.

Ключові слова: Китай, емісія, парникові гази, декарбонізація, вугілля, вуглеводні, енергетика, ВДЕ, атомна енергетика, виробництво, дегазація вугілля.

The review examines the features of China's energy decarbonization and its potential impact on solving problems. It can also be useful in developing a strategy for decarbonizing the economy and restoring Ukraine's energy potential. It is shown that China is the leader in the emission of greenhouse gases into the earth's atmosphere (about 30% of global carbon dioxide emissions in the world compared to 10.7% in 1990). Under the influence of international organizations, China is adopting several programs to decarbonize its economy, and in 2020 announced its intention to achieve carbon neutrality by 2060. The adopted program of decarbonization of the Chinese economy will cost the country more than 5 trillion—international dollars. Therefore, the trade-off between environmental protection and economic growth is the biggest challenge for China. The reason for the high emission of greenhouse gases in China is the structure of the national economy and industry, focused on the use of fossil hydrocarbons. Therefore, China should optimize the structure of its exports and imports of raw materials. The most energy-intensive industries (ferrous and non-ferrous metals) should be partially transferred to other countries. The focus should be on the production of goods with minimal energy intensity and with a high share of VAT. In terms of total energy reserves, China ranks third in the world, behind the United States and Russia. Currently, the Chinese economy consumes about 20% of the world's energy consumption. In the structure of energy carriers, coal makes up almost 60% and is almost twice the world average. Reducing the economy's dependence on coal will be one of the major challenges the country will face in its fight against climate change. It is shown that despite the earlier commitments to reduce coal energy, China is not ready to completely abandon the use of coal. However, in the context of the energy crisis and the presence of its coal reserves (141.6 billion tons or 13.24% of world reserves), China must, without reducing the volume of its production and imports of natural gas and oil (more than 40% of demand), special attention pay attention to the technologies of coal degassing, as well as the capture, storage and use of CO₂ (CCS - carbon capture and storage) at all stages of industrial production.

Keywords: China, emissions, greenhouse gases, decarbonization, coal, hydrocarbons, energy, renewable energy, nuclear energy, production, coal degassing.

Постановка проблеми. Боротьба з глобальною зміною клімату є одним із пріоритетних завдань світової спільноти. У 2019 році 66 країн взяли на себе зобов'язання щодо скорочення емісії парникових газів до нульового рівня. За нульовий рівень прийнято емісію 1990 року. Серед них – США, ЄС, Великобританія. У 2020 році до них приєднався Китай – один із найбільших емітентів парникових газів. [1, 2].

Пильну увагу до Китаю не випадково. Економіка Китаю друга після США економіка світу та лідер за

обсягом промислового виробництва. Структура економіки Китаю, як і раніше, відрізняється дуже високою енергоємністю. На частку деяких галузей важкої промисловості Китаю, таких як виробництво сталі та цементу, припадає понад 50% світового виробництва та 17% сукупних викидів парникових газів.

За даними Міжнародного енергетичного агентства, Китай є лідером у виробництві чорних і кольорових металів. У 2022 році на частку Китаю припадає 50% світового виробництва сталі, 35% -

алюмінію та 35% - міді, а також деяких кольорових металів - кобальту (70%) та літію (60%).

За даними Світового банку (WB - World Bank) у 2020 році на частку Китаю припадало 18,4% загального ВВП планети. Це суттєво вище, ніж у США (15,7%) та ЄС (15,1%), а також майже в шість разів більше, ніж у Росії (3,1%) та Україні (0,4%) разом узятих. Згідно з прогнозами WB до 2050 року економіка Китаю займатиме перший рядок у світі за ВВП та темпами розвитку енергетичного комплексу [3].

Причиною високої емісії парникових газів у Китаї – це структура національної економіки та промисловості, яка орієнтована на застосування викопних вуглеводнів. А також недостатня енергетична ефективність їх використання і попит на енергоносії, що стрімко зростає.

Китай лідирує за емісією в атмосферу землі парникових газів. Через війну інтенсивного зростання економіки забруднення довкілля країни досягло критичних масштабів. Нині частку країни припадає близько 30% викидів вуглекислого газу світі у порівнянні з 10,7% 1990 року. Це більше ніж у США та ЄС разом узятих. Щороку до атмосфери викидається близько 10 млрд тонн вуглекислого газу. З них - 40,5% промисловими підприємствами, 51,6% у сфері послуг та 7,2% у сільському господарстві [4-6].

У табл. 1 наведено список країн з емісії парникових газів у перерахунку на діоксид вуглецю, а також питома емісія (вуглецева залежність) на одиницю ВВП та одиницю чисельності населення. 2020 року в Китаї проживало 18% населення планети, яке споживало близько 28% усіх світових копалин.

Як впливає з представлених даних, ВВП Китаю, який формувався за рахунок енергоємних галузей виробництва, має найвищий показник вуглецевої залежності 0,41 т 1000 CO₂ на \$ (міжнародний долар). Це в 1,6 разів більше за середньосвітовий рівень і майже в 3 рази більше питомих викидів країн ЄС. Подібну вуглецеву залежність мають Україна та Росія - 0,33 і 0,36 т CO₂ відповідно.

У цьому слід зазначити, що з урахуванням населення ці відмінності нівелюються. Найбільша емісія на душу населення припадає на США та Росію: (13,47 та 12,5 кг CO₂, відповідно). Висока емісія діоксиду вуглецю вказує на екстенсивний характер економіки та незбалансованість її структури. Тому екологія – найслабша ланка економіки Китаю, який хоче позбутися іміджу «головного забруднювача» планети.

Враховуючи високу енергоємність ВВП України, науковий та практичний інтерес становить досвід Китаю щодо декарбонізації своєї економіки, в тому числі, за рахунок сучасних технологій використання викопних теплоносіїв.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Акцент на декарбонізацію економіки Китаю пов'яза-

ний із загальною негативною екологічною ситуацією. Забруднення довкілля через швидке екстенсивне економічне зростання призвело до формування серйозних загроз національній безпеці. Додатковий негативний внесок у погіршення екологічної ситуації привносить загальна неефективність використання природних ресурсів.

У цих умовах керівництво Китаю вживає низку програм, що передбачають заходи щодо боротьби зі зміною клімату та контролю за викидами парникових газів. Основна увага приділяється оптимізації структури виробництва, енергозбереженню та оптимізації структури паливно-енергетичного балансу. Паралельно здійснює пілотні проекти торгівлі квотами на викиди [7-10].

Особливості декарбонізації енергетики Китаю проаналізовано у роботах міжнародних експертів, у тому числі щодо зміни клімату - Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [11-13].

Китай дуже обережно говорить про екологічні проблеми та довго відмовлявся підписувати Паризьку угоду в повному обсязі. На 75-й сесії Генсамблеї ООН у 2020 році Голова КНР вперше оголосив про наміри досягти вуглецевої нейтральності китайської економіки до 2060 року після передбачуваного досягнення піку викидів до 2030 року. А потім, виступаючи на кліматичному Саміті в Гаазі, заявив, що в короткостроковій та середньостроковій перспективах Китай планує зменшити залежність ВВП від вуглецю на 65% і знизити частку використання викопних видів палива в загальному енергобалансі країни на 25% порівняно з рівнем 2005 року.

Щоб досягти вуглецевої нейтральності до 2060 року Китаю, необхідно вже сьогодні приділяти основну увагу питанням енергетики. Енергетика має стати головною рушійною силою зниження викидів вуглецю за рахунок переходу на відновлювані джерела енергії та атомну генерацію.

Напередодні кліматичного саміту в Глазго 2022 року Китай опублікував два програмні документи, в яких викладено основи довгострокової кліматичної стратегії Китаю і дається детальний опис цілей по кожній галузі. Перший із них стратегічний - Working Guidance. Другий конкретніший і стокується різних галузей - Action План.

За даними Міжнародної консалтингової компанії Roland Berger (Німеччина) у складанні цих програм брали участь представники 35 країн та було підписано 38 угод. На 12 Міжнародному форумі «Екологія» у травні 2021 року в Москві (Росія) політичні та регуляторні інструменти стратегії китайського уряду були представлені Roland Berger у вигляді доповіді та стенду (рис. 1), що ілюструє поточні проекти з декарбонізації китайської економіки та плани на 2021–2025 роки. Якщо мети Китаю буде досягнуто, це знизить прогнози глобального потепління на 0,2–0,3 градуси за Цельсієм [14].

Working Guidance містить перелік заходів, що сукупно створюють інструментарій кліматичної політики. Вони показують, що основний потенціал зниження вуглецевої місткості економіки країни відводиться на 2021-2025 роки і знаходиться в галузі енергозбереження. При цьому загальний обсяг викидів продовжить зростати і досягне піку лише до 2030 року. Підвищити енергетичну безпеку Китаю планують за рахунок скорочення споживаних обсягів викопного палива та зниження залежності від джерел енергії, що імпортуються.

У п'ятирічному плані соціально-економічного розвитку КНР на 2021–2025 роки закріплено конкретніші цілі - зниження рівня споживання енергії на одиницю ВВП на 13,5% і скоротити емісію CO₂ на 18%. Там само передбачено зниження обсягів використання вугілля у промисловості, у тому числі у металургії. За попередніми розрахунками відповідно до декларованих цілей вугільна (найбрудніша) енергетика, повинна через 40 років скоротитися в 25 разів. Нафта і газ мають використовуватися на 60–70% менше, ніж зараз і найближчим часом.

Зазначені цілі далі деталізуються профільними органами. Наприклад, наприкінці 2021 року Національна комісія з розвитку та реформ КНР (NDRC) представила план дій (Action Plan for Carbon Dioxide Peaking Before 2030), у якому відбито роль природного газу як додаткового (страхуючого) інструменту у процесі вироблення електричної енергії та декларується орієнтація на видобуток власного газу. При цьому в структурі паливно-енергетичного балансу частка альтернативної енергетики має становити понад 25%. [15].

Таким чином, досягнення необхідних рівнів скорочення викидів означає масштабний перехід на використання атомної енергії та відновлюваних джерел для генерації електроенергії. Особливо якщо китайська економіка й надалі планує зростати. Можливо, темпи її зростання у відсотках сповільнююватимуться, але в абсолютних цифрах вони й надалі становитимуть сотні мільярдів, якщо не трильйони доларів на рік.

Мета роботи – дати рекомендації для прискореного енергетичного переходу та декарбонізації не тільки економіки Китаю але й інших країн з високою вуглецевий залежністю ВВП (наприклад України), а також що розвиваються країн на етапі їх індустріалізації.

Виклад основного матеріалу

Аналіз структури енергетики. Викопні теплоносія. У питаннях енергетики найбільш компетентною є Міжнародне енергетичне агентство (International Energy Agency - IEA). Автономний міжнародний орган у рамках Організації економічного співробітництва та розвитку (ОЕСР). Утворено в Парижі 1974 року після нафтової кризи 1973—1974 років. Основна заявна мета цієї організації, яка охоплює 29 країн-учасниць, — сприяння міжнародному співробітництву в галузі вдосконалення світової структури попиту та пропозиції

енергоресурсів та енергетичних послуг (<https://www.iea.org>).

Інформацію про викопні енергоносії можна отримати на платформі - Carbon Tracker (лондонський некомерційний аналітичний центр, що вивчає вплив зміни клімату на фінансові ринки). Це незалежний фінансовий аналітичний центр, який проводить поглиблений аналіз впливу переходу енергетики на ринки капіталу та потенційних інвестицій у дорогі та вуглеродомісткі види палива (<https://carbontracker.org>).

Цікавим є структура паливно-енергетичного балансу Китаю, а також абсолютне споживання вуглеводнів та їх роль в енергетичній безпеці країни. Структура енергетичного балансу економіки Китаю 2020 року наведено рис. 2. Як випливає з наведених даних, основним енергоносієм є вугілля. Частка нафти і газу в загальному балансі невелика-20 і 2% відповідно. За попередні п'ять років збільшилося використання альтернативних джерел та атомної енергії. За цей період загальна витрата енергії збільшилася на 14%, з них 66% за рахунок вугільної генерації [15].

За сумарними запасами енергоносіїв Китай посідає третє місце у світі, поступаючись США та Росії. Нині китайська економіка споживає понад 20% світового споживання енергоносіїв. При цьому спостерігається сильна диспропорція використання різних видів палива. У структурі енергоносіїв вугілля становить майже 60%. За останні двадцять років цей показник знизився на 20%, але, як і раніше, більш ніж удвічі перевищує середньосвітовий рівень [16-17].

За даними BP (British Petroleum) за запасами вугілля Китай посідає 4 місце у світі після США, Росії та Австралії. У 2019 році вони становили 141,6 млрд. тонн або 13,24% від світових запасів. В даний час Китай є світовим лідером із видобутку цього виду палива. При цьому його частка у світовому видобутку продовжує зростати. 2020 року в Китаї видобували 3,52, а 2022 року – 4,37 млрд. т. вугільної продукції. Переважно це антрацит та кам'яне вугілля з низьким вмістом сірки. Більше третини видобутку припадає на три провінції на півночі та в центрі країни – Внутрішню Монголію, Шаньсі та Шеньсі.

Структура світового видобутку вугілля в 2020 по країнах представлена на малюнку 3 [17]. У цей період Китаю припадало на частку 50,7% світового видобутку. Власних запасів недостатньо і особливо коксівного вугілля, найбільш затребуваного в чорній металургії. Тому Китай є великим світовим імпортером вугілля. Найбільшими постачальниками вугілля до Китаю є Індонезія, Австралія та Росія, імпорт яких у 2018 році склав: 126,6; 52,4 та 23,1 млн тонн, відповідно. У 2022 році Китай зняв заборону на імпорт вугілля з Австралії. За перші два місяці 2023 року Китай збільшив імпорт вугілля на 71%, порівняно з 2022 роком, до 60,64 млн. тонн.

Використання вугілля в таких великих масштабах стало можливим внаслідок виключно низької ціни. Ціна вугілля власного видобутку була майже в 6 разів дешевшою за імпортований зріджений газ і в 2 рази дешевша за природний газ, що поставляється трубопроводами. Водночас проблеми з екологією та тиск з боку міжнародних організацій можуть прискорити переведення електростанцій на газ. У першому півріччі 2021 року також збільшилося виробництво електроенергії за рахунок використання природного газу на 15% порівняно з 2019 роком.

Наприкінці 2020 року ситуація на світових ринках різко змінилася. Внаслідок економічної кризи у 2020 році через різке збільшення ціни на газ та його дефіциту ціна вугілля на міжнародних ринках зросла. У 2021 році вона збільшилася у 2,5 рази з 88 до 218 долл. на тону. Цього року імпорт вугілля Китаєм досягнув 5-річного максимуму і продовжує зростати. У 2022 році імпорт збільшився за рахунок постачання з Росії. Цьому сприяло нижча ціна Російського вугілля 150 у порівнянні з 210 долл. на тону з Австралії. У 2022 році Китай різко наростив власний видобуток вугілля до 4,5 млрд. т і збільшив імпорт енергетичного вугілля до 293 млн. т.

У 2021 році Китай опинився на межі катастрофи. При цьому, незважаючи на власний високий видобуток вугілля, він не зміг забезпечити безперебійну роботу теплових електростанцій. Цьому сприяла кліматична позиція керівництва Китаю зниження емісії діоксиду вуглецю. Уряд Китаю посилив тиск на шахти та знизив видобуток вугілля. Через дефіцит вугілля зупинилися енергоблоки. У 2021 році імпорт склав 304 млн тон за загальної потреби – 4,04 млрд т.

Китай займає перше місце у світі за споживанням електроенергії, що отримується від спалювання вугілля. Основні обсяги вугілля використовують у електроенергетиці. У 2019 році близько 69% електричної енергії в країні вироблено на ТЕЦ із використанням вугілля. У 2020 році на Китай припадало понад половину вугільної енергетики світу. Тому китайський уряд, за рахунок регуляторної політики, намагається знизити загальне споживання вугілля переведенням підприємств на природний газ, а також збільшенням обсягів вироблення електроенергії на атомних електростанціях.

І хоча Китай прагне наростити власний виробіток, його шахти видобувають відносно низькоякісне паливо, яке може бути використане у низці галузей. На думку міжнародних організацій, залежність економіки Китаю від одного джерела енергії (вугілля) створює певну загрозу національній безпеці країни.

Зниження залежності економіки від вугілля стане однією з головних складнощів, з якими зіткнеться країна у боротьбі зі зміною клімату. Вугілля не лише найдешевший вид палива. У розрахунках слід враховувати, що середній термін

експлуатації вугільних електростанцій 14 років (в США - 39 років). Вони навіть повернули початкові інвестиції. Крім того, уряд Китаю продовжує вводити в дію нові вугільні електростанції. У першому півріччі 2020 року в період кризи, спричиненої епідемією COVID, видано дозволи на 17 проектів. При цьому на ресурсі Carbon Tracher показано, що на 43% китайських вугільних електростанцій виробництво електричної енергії дорожче, ніж із відновлюваних джерел. Якщо не відбудеться істотних змін у вартості викопних джерел енергії, вугілля залишиться найбільш доступним для Китаю паливом, тому що при сучасному рівні виробництва він має власні запаси вугілля на 30 років. Тому Китай не готовий і не повинен повністю відмовитися від використання вугілля, дуже затребуваного в енергетиці та металургії.

Китайська рада з електроенергетики (China Electricity Council) у 2019 році опублікував статистичні дані про розвиток цієї галузі. Встановлена потужність електроенергетики КНР перевищила позначку 2000 ГВт. Вироблення електроенергії за поточний рік зросла на 4,7% і склала 7325 ТВт * год (це в сім разів більше, ніж у Російській Федерації). Структура електроенергетики Китаю представлена на рис. 4 [18].

При цьому слід зазначити, що понад 60% вугільних електростанцій, що діють сьогодні у світі, виробляють електроенергію з вищою вартістю, ніж вона могла б бути вироблена новими електростанціями, що працюють на основі відновлюваних джерел енергії. Не пізніше 2030 року практично скрізь у світі дешевше побудувати нові вітрові або сонячні електростанції, ніж продовжувати експлуатувати (амортизовані) вугільні. Такі висновки містяться у доповіді Carbon Tracker, в якому частка вугілля в енергоспоживанні Китаю має знизитися до 2025 року до 50%.

Ця компанія порівняла наведену вартість одиниці енергії (LCOE) наземних вітрових та сонячних фотоелектричних систем із наведеною вартістю вугільних станцій та їх питомими операційними витратами. Компанія проаналізувала 95% діючих та проєктованих вугільних об'єктів. Вона вважає, що інвестиції у вугільну генерацію ніколи не окупляться. Водночас у всьому світі сьогодні плануються або вже будуються 1046 нових вугільних електростанцій загальною потужністю 499 ГВт та вартістю 638 мільярдів доларів.

Власних запасів нафти та газу в Китаї недостатньо – не більше 2% від світових. Основну частину цих вуглеводнів він імпортує із інших країн. Китай займає 9 місце за запасами та 6 місце з видобутку нафти у світі. 2020 року його запаси оцінювалися в 3,5 млрд. т. (1,5% світових запасів). 2014 року Китай став найбільшим імпортером нафти. За 20 років імпорт нафти до країни збільшився втричі та продовжує зростати. Зростання імпорту нафти викликане тим, що власний видобуток обходиться майже вдвічі дорожче. Основними постачальниками нафти у 2022 році є Са-

удівська Аравія, Росія та Малайзія з обсягами поставок 87,5, 86,2 та 35,7 млн. т. відповідно. Цього року імпорт нафти становив 204,7 млн. т. Російську нафту Китай отримував за ціною 52 дол. за тону з дисконтом 30%.

З метою нейтралізації збоїв у постачанні нафти створено систему стратегічних резервів обсягом 16 млн т. За річної потреби 240 млн т нафти це явно недостатньо. На думку фахівців, стратегічний запас має забезпечити безперебійну роботу підприємств протягом двох місяців, тобто становитиме понад 40 млн т. У 2008 році розпочато будівництво сховища нафтового резерву ємністю до 1 млн. кубометрів комерційного характеру [19-20].

За даними BP (British Petroleum) за запасами природного газу Китай займає 6 місце (після Туркменістану), а з видобутку 4 місце у світі (рис. 5). Власний видобуток газу зростає. 2020 року вона склала 194, 2021 року - 209,2 млрд кубометрів. Це майже в 4,6 разів менше за видобуток США і в 3,4 разів менше, ніж видобуває Росія. Вказаних обсягів газу недостатньо. Дефіцит компенсується імпортом природного газу з Австралії, Росії та країн Середньої Азії.

У 2019 році імпорт природного газу становив 34,56 млн. т, з них основними постачальниками були Туркменістан (57,2%), Росія (17,2%), Узбекистан (2,6%) та Казахстан (10,7%). У 2020 році провідним постачальником газу залишався Туркменістан, обсяги постачання якого склали 20,7 млн т природного газу.

Згідно з прогнозами Міністерства природних ресурсів Китаю, а також департаменту нафти та газу Держуправління у справах енергетики споживання природного газу в Китаї й надалі матиме тенденцію зростання аж до 2050 року. Так, наприклад, у 2016 році обсяг споживання становив 280,3, у 2019 році – 310 млрд кубометрів. При цьому слід зазначити, що до 2009 року Китай самостійно забезпечував себе природним газом.

Слід зазначити, що природний газ розглядається китайськими експертами як пріоритетне (проміжне) паливо. У контексті декарбонізації використання природного газу при виробленні електроенергії краще, оскільки має менший обсяг емісії. Можливо, тому споживання природного газу в Китаї за останні 10 років зросло більш ніж у 3 рази і склало в 2020 році 330,6 млрд кубометрів, з них 42% (порівняно з 10% у 2010 році) - імпорт. Вважають, що Китай може стати найбільшим імпортером природного газу після Німеччини, Італії та Туреччини [21].

Особливе місце серед постачальників газу займає Росія. З 2019 року постачання природного газу з Росії здійснюється газопроводом «Сила Сибіру» з Якутії. 2021 року цією магістралі прокачали 10,39, 2022 року - 15 млрд кубометрів. У 2023 році обсяг постачання буде збільшено до 22 млрд кубометрів. При цьому ціна Російського природного газу була значно меншою, ніж на ринках ЄС та США. У грудні 2022 року вона становила 545 дол.

за тону і була в 1,6 разів меншою за ціну газу на Лондонській біржі.

Однак міжнародні санкції проти Росії, зокрема на експорт його енергоносіїв, змусив Китай поставити на паузу договір на будівництво газопроводу "Сила Сибіру -2". Водночас у квітні 2023 року Китай заявив про проект Центрально-Азійського газопроводу в рамках ініціативи «Пояс і шлях» із річним обсягом прокачування 30 млрд. кубометрів. Надалі по ньому має пройти газ із Туркменістану, хоча його ціна буде на 30% дорожчою за Російський газ.

За підсумками 2021 року Китай уперше став світовим імпортером зрідженого природного газу – ЗПГ. За обсягом постачання лідером стала Австралія (21,9 млн т). Друге та третє місце посіли Катар та Малайзія, з обсягом поставок: 15,7 та 7,4 млн т, відповідно. Імпорт ЗПГ із Росії становить 3,77 млн т. Договір із США на 4,0 млн. т на рік підписано на найближчі 20 років. Водночас міжнародні оглядачі звертають увагу, що КНР перепродає частину імпортованого газу до Європи за вищою ціною.

Однак, різке коливання світових цін на природний газ (підвищення у 2022 році та різке зниження на 67% на початку 2023 року) та, відповідно, вартості електричної енергії, що виробляється на основі природного газу, може внести свої корективи до енергетичного балансу Китаю. Очікують, що через фізичний дефіцит енергоносіїв вартість природного газу на світових ринках може різко збільшитися.

Саме тому 2021 року в рамках антикризової програми підтримки національної економіки Пекін послабив обмеження на введення в експлуатацію нових вугільних електростанцій та розширив кредитування вугільних інфраструктурних проектів. Це ще більше ускладнило досягнення поставленої мети на шляху до декарбонізації економіки.

Тенденція розвитку вугільних технологій. У контексті декарбонізації енергетичного балансу КНР в умовах енергетичної кризи слід звернути увагу на відому технологію газифікації вугілля. Інтерес до цієї теми прямо пропорційний до цін на нафту на світових ринках. Слід зазначити, що періодично до цієї теми повертаються у країнах із великими запасами вугілля. Але глобально у світі через низку причин ця технологія розвивається недостатньо. Серед основних причин слід зазначити великі капіталовкладення в інфраструктуру об'єктів та коливання світових цін на нафту та газ. Проте, під впливом міжнародних організацій, поріг входження у цю технологію поступово знижується, зокрема рахунок відмови від двигунів внутрішнього згоряння [22].

У 2021 році на 17-ій сесії кліматичного саміту в Женеві була розглянута доповідь міжурядової групи експертів зі зміни клімату (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) про стан технології газифікації вугілля та масштаби його впровадження у світову енергетичну систему [23].

Технологія газифікації вугілля у промисловому масштабі існує понад 20 років. Будівництво великих об'єктів здійснювалося на початку 90-х років у США (Північна Дакота - три блоки по 200-300 МВт електричної потужності), Західній Європі (Німеччина, Голландія - станція Buggenum) та Китаї. В даний час промислове виробництво вуглеводнів з вугілля існує у двох країнах: Китаї та ПАР (після введення ООН у 2021 році ембарго на постачання нафтопродуктів режиму апартеїду). Лідером цієї технології є Китай. У період 2018–2020 років у КНР введено в експлуатацію 150 нових підприємств, а 2023 року буде завершено будівництво 220 заводів.

Загалом у світі збудовано понад 500 станцій. Розробкою газифікації вугілля займаються солідні американські фірми General Electric (процес Техасо), E-Gas, Kellogg-Brown-Root (KBR, газифікатор TRIG), а також європейські компанії, наприклад, Shell – відомий англо-голландський концерн, що поставив велику кількість промислових газифікаторів у різні країни світу. Німецька фірма Siemens постачає газифікатори для того ж Китаю. На сьогодні основні компанії, що мають передові технології спалювання (газифікація) вугілля: Chevron, General Electric, Lurgi, ExxonMobil, Sasol, Siemens та Shell.

Департамент енергетики США та Національна енерготехнологічна лабораторія (National Energy Technology Laboratory – NETL) ведуть розробку технології та на постійній основі оновлюють найбільшу базу даних промислових газифікаторів. Ця інформація доступна на багатьох спеціалізованих інтернет-ресурсах [<https://www.energy.gov>].

У процесі газифікації вугілля в газифікаторі одержують неочищений синтетичний газ (SNG – Substitute of natural gas). Після охолодження та очищення на спеціальних комплексах переробки з нього одержують різні хімічні продукти: від аміаку, добрив, метанолу, бензину до заміниника природного газу, а також водню, який може бути використаний при виробництві цементу та виплавці сталі. Склад цих комплексів та вартість заводу з газифікації залежить від цільового продукту. Особливе місце на ринку синтезу газу займає Азіатсько-тихоокеанський регіон, в якому спостерігається найвище у світі зростання ВВП, і відповідно, попит на електричну енергію. Зростання ринку планується за рахунок розвитку технології підземної газифікації вугілля [24-25].

У світі багато теплових електростанцій розглядають цю технологію як потенційний перехід від спалювання викопних теплоносіїв на новий вид енергії. Ефект цієї технології залежить від співвідношення ціни різних енергоносіїв.

У жовтні 2017 року в Женеві під егідою Європейської економічної комісії (ЄЕК ООН) відбувся круглий стіл, в якому оцінили можливості розробки технології газифікації вугілля для вироблення електроенергії. Були розглянуті різні варіанти, зокрема комбінований цикл комплексної газифікації

вугілля. Розглянуто приклади та впровадження цього процесу в енергетику низки країн. Лідером цієї технології є Японія [26].

Першу вугільну китайську електростанцію з комбінованим циклом комплексної газифікації (IGCC), який є процесом газифікації вугілля, що перетворює вугілля на газ перед його спалюванням, планували відкрити в 2009 році в Тяньцзіні недалеко від Пекіна. Ця станція потужністю 650 МВт (вартістю 5,7 млрд. долл.) була розроблена в рамках проекту GreenGen, стане спільним підприємством групи державних підприємств і Peabody Energy – найбільша у світі приватна вугледобувна компанія (США), яка у 2016 році оголосила себе банкрутом.

В установках (IGCC) використовуються газифікатори для отримання синтезу газу для турбін з комбінованим циклом для вироблення електроенергії. Їх ККД становить близько 45% і мають найнижчий рівень викидів, оскільки використовують перед спалюванням очищений газ. Нині КНР має 56 діючих газифікаційних заводів та 29% світової потужності. За обсягом вироблення електроенергії це вище підприємств у ПАР (фірми SASOL) з часткою 20% світових потужностей.

У 2006 році внаслідок тривалого зростання цін на нафту Китайський уряд створює спеціалізовану держкомпанію з реалізації проектів газифікації вугілля – Synfuels Китай. А в 2008–2009 роках у Китаї відкриваються кілька виробництв рідкого палива, найбільшим із яких є підприємство Shenhua DCL, з продуктивністю 2 млн т вугілля на рік. Інвестиції в це виробництво склали 1,5 млрд. долл. у цінах 2008 року. У 2009 році було запущено завод Yitai ICL із продуктивністю менше 500 тис. т вугілля на рік. Також було збудовано кілька демонстраційних виробництв [27].

Сектор «Енергетика» концерну Siemens отримав замовлення на постачання до Китаю восьми установок газифікації вугілля. Установки тепловою потужністю 500 МВт кожна була встановлена на новому заводі з газифікації вугілля в місті Йілі (Yili), провінція Сінцзян. Завод буде переробляти суббітумінозне вугілля, що видобувається в провінції, в синтетичний природний газ. Мета проекту – знизити обсяги імпорту природного газу для вироблення електроенергії та тепла. Замовником є енергетична компанія CPI Xinjiang Energy Co. Ltd, дочірнє підприємство Державної енергетичної корпорації Китаю (China Power Investment Corporation), яка входить до п'ятірки найбільших у країні з виробництва електроенергії. Завод із газифікації вугілля вийшов на повну потужність наприкінці 2014 року. Потім синтетичний газ піддається очищенню (десульфурація) і після метанотації відповідає жорстким вимогам китайських операторів трубопроводів.

Найбільш актуальним та перспективним напрямом технології дегазації вугілля є сегмент, спрямований на розробку процесів уловлювання, зберігання та транспортування діоксиду вуглецю.

Вперше про них офіційно заговорили 1990 року. Раніше 1988 року при ООН було створено спеціальну групу експертів (IPCC) щодо зміни клімату. У 2002 році на Міжнародній конференції в Парижі ними була представлена спеціальна доповідь «Вловлення та зберігання двоокису вуглецю». У роботі брали участь 125 міжнародних експертів, а її ліцензували понад 200 фахівців з усього світу [28-29].

Компанія « Bellona Europa » в особі свого директора Дж. М. Хелсета на 12-й щорічній міжнародній зустрічі « Eurocoke », що відбулася в Барселоні (Іспанія). Summit 2016» за участю 60 провідних кампаній світу представила доповідь про перспективи створення в Європі структури уловлювання, зберігання та використання CO₂ (CCS - carbon capture and storage). У 2015 році Bellona розробила для Норвегії основи подібної стратегії, основними елементами якої є: створення ринку CO₂, технології уловлювання викидів діоксиду вуглецю від існуючих джерел, а також розробка інфраструктури транспортування та зберігання CO₂. Вона ж оцінила економічну ефективність запропонованих технологій.

Раніше у 2009 році ця технологія активно підтримувалась німецькими енергетичними компаніями, але критикувалася незалежними експертами. Вони вважали, що вона не дає чіткої відповіді на деякі економічні питання. У тому числі, який має бути обсяг підземних сховищ діоксиду вуглецю? У Німеччині його нема. До того ж потрібні великі капіталовкладення в реконструкцію вугільних ТЕЦ. На думку Ріхорда Хайнберга (Carbon Tracker) збільшення споживання у світі природного газу знижує можливість використання даної технології.

Оскільки повністю відмовитися від вугільної енергетики неможливо, Китаю знадобиться і далі скорочувати викиди, застосовуючи технології CCS поглинання, захоплення і зберігання вуглецю. Технологія CCS необхідна на вугільних електростанціях, де вона ще не набула масштабного поширення. Досі в Китаї виконано 10 пілотних проєктів, проте їх результати незначні. Сукупна потужність, що уловлює, становить менше 0,01% існуючих сукупних викидів вуглецю. Тому в перспективі передбачається розширити сферу застосування технології CCS та підвищити її ефек-

тивність, а також прагнути досягти рівнів впровадження технології CCS понад 90%.

Слід зазначити, що на думку кліматологів та міжнародних експертів (IPCC) будь-які викиди діоксиду вуглецю мають бути врівноважені штучним уловлюванням. І вже ясно, що технології CCS буде недостатньо для збереження клімату планети. У тому числі через відсутність вторинного використання діоксиду вуглецю, наприклад, у нафтогазовій промисловості. Щорічна емісія діоксиду вуглецю не дає шансів досягти нульового циклу промислового виробництва.

Разом з тим пандемія COVID 19 вкотре виявила нестачу сучасної енергетичної системи – її залежність від видів палива.

Висновки

Причиною високої емісії парникових газів у Китаї – це структура національної економіки, яка орієнтована на застосування викопних вуглеводнів. Тому Китаю слід оптимізувати структуру експорту своєї продукції та імпорту сировинних матеріалів. Найбільш енергоємні виробництва (чорних та кольорових металів) частково перенести до інших країн. Основну увагу слід приділяти виробництву товарів з мінімальною енергоємністю та високою часткою ПДВ.

У структурі енергоносіїв вугілля становить майже 60%. Зниження залежності економіки від вугілля стане однією з головних складнощів, з якими зіткнеться країна у боротьбі зі зміною клімату. В умовах енергетичної кризи та наявності власних запасів вугілля (141,6 млрд тонн або 13,24% від світових запасів), Китай повинен, не знижуючи обсягів власного видобутку та імпорту природного газу та нафти (понад 40% вуглеводнів імпортується), особливу увагу приділяти альтернативних вугільних технологій, у тому числі дегазації вугілля, а також уловлювання, зберігання та використання CO₂ (CCS - carbon capture and storage) на всіх етапах промислового виробництва.

Диверсифікація енергетичного балансу має стати основним способом забезпечення економічної безпеки країни, а енергетика є головною рушійною силою зниження викидів вуглецю, у тому числі за рахунок переходу на відновлювані джерела енергії та атомну генерацію.

Перелік використаних джерел

1. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.45.2022.276242> Назюта Л.Ю. Степаненко Д.В. НА ШЛЯХУ ДО ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ СВІТОВОЇ ЕКОНОМІКИ. ГЛОБАЛЬНЕ ПОТЕПЛІННЯ. КЛІМАТИЧНІ КОНФЕРЕНЦІЇ ООН. ВІСНИК ПРИАЗОВСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ, (2022), Вип. 45, С.97–108.
2. Шпеню Д. США та Китай “благословили” декарбонізацію. Minprom . <https://minprom.ua/opinion/277817.html> (опубл. 12.11.2021)
3. Contributors до Wikipedia projects. (2023). List of countries by GDP (PPP). [https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_GDP_\(PPP\)](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_GDP_(PPP))
4. Інтенсивність використання енергії на одиницю ВВП дані про інтенсивність використання енергії Enerdata . (nd). <https://energystats.enerdata.net/total-energy/world-energy-intensity-gdp-data.html>
5. Contributors до Wikimedia projects. (2023a). Список країн емісії CO₂. https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_carbon_dioxide_emissions

6. <https://www.ipcc.ch/report/climate-change-the-ipcc-1990-and-1992-assessments/> Climate Change: The IPCC 1990 and 1992 Assessments
7. Безус В. За якою стратегією розвивається енергетика Китаю? (nd). <https://iclub.energy/blog/valeriybezus/tpost/h2k7m2mk3s-po-yaki-strateg-rozvivatsya-energetika-k> (опубл. 25.10.2019)
8. Подрез Ю.В., Жуков О.В. СТРАТЕГІЧНЕ ПАРТНЕРСТВО МІЖ КНР, ЄС І США У СФЕРІ ЕНЕРГЕТИКИ Й МІЖНАРОДНОЇ ОХОРОНИ ДОВКІЛЛЯ (2000–2016 РР.). Вісник НТУ. 2022. Т.33(72). №1. С. 157-162. DOI https://doi.org/10.32838/2663-5984/2022/1_23
9. МІРОШНИЧЕНКО Б. Китай на межі катастрофи через брак вугілля, простоюють тисячі підприємств. (nd.). <http://www.epravda.com.ua/ukr/publications/2021/10/5/678403/> (опубл. 05.10.2021)
10. MEA: перехід до екологічно чистої енергії відбувається у всьому світі, і його неможливо зупинити. <https://nangs.org/news/renewables/mea-perekhod-k-ekologicheskii-chistoi-energii-proiskhodit-vo-vsem-mire-i-ego-nevozmozhno-ostanovit>
- Кількісний аналіз плану досягнення Китаєм вуглецевий нейтральності до 2060 р. (nd.). Oil And Gas Ukraine. <https://oil-gas.com.ua/novosti/Kilkyisnyi-analiz-planu-dosyagнення-Kitaem-vuglecevoi-neytralnosti-do-2060-p-na-osnovi-vikorystannya-v-yakosti-energonosiv-metanolu-i-amiaqu>
12. Мастепанов С. Китай диктує енергетичну політику XXI століття. Международные процессы, International Trends. Volume 16. No. 3 (54). July–September / 2018 DOI 10.17994/IT.2018.16.3.54.1 <https://web.archive.org/web/20220319201957>
13. <https://federalizm.rea.ru/jour/article/view/245> Китай: декарбонізація економіки та дотримання принципів ESG С. А. Луконін, Б. А. Аносов <https://doi.org/10.21686/2073-1051-2021-3-192-205>
14. Михайленко М. XII Міжнародний форум "Екологія-2021." Roland Berger. <https://www.rolandberger.com/ua/Media/XII-Mizhnarodnyi-forum-Ekologiya-2021.html> Senior Partner, Global Managing Director Milan Office, Южная Европа (опубл. 24.05.2021)
15. Онофрейчук М. Енергетична політика сучасної КНР. <https://archer.chnu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/3553/>
16. Аналіз розміру та частки ринку вугілля в Китаї - тенденції зростання та прогнози (2023 - 2028 рр.) <https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/china-coal-market>
17. Китай на межі катастрофи через брак вугілля, простоюють тисячі підприємств. На що це може вплинути? <https://www.epravda.com.ua/ukr/publications/2021/10/5/678403/> (опубл. 05.10.2021)
18. Електроенергетичний комплекс Китаю. <https://www.eeseaec.org/elektroenergeticeskij-kompleks-kitaia>
19. Споживання природного газу в Китаї підтримує тенденцію зростання до 2050 року. (nd.). Сінхуа новини. http://russian.news.cn/2019-09/01/c_138355322.htm
20. Громов О. "Перспективи газового галузю Китаю." Енергетична політика, 2022.1(167) С. 50-69. УДК 339.5:665.72 DOI 10.46920/2409-5516_2022_1167_50
21. Мількін С. Росія прокачала по « Сілі Сибіру » до Китаю у 2022 році рекордний об'єм газу. Відомості. (опубл. 16.01.2023). <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2023/01/16/959224-rossiya-prokachala>
22. Чумаченко І. Газифікація вугілля : світовий досвід та перспективи реалізації проєктів в Україні. (опубл.03.10.2021). <https://iclub.energy/igor-chumachenko/tpost/n5mii7vmi1-gazifikatsiya-uglei-mirovoi-opit-i-persp>
23. Можливості розробки та впровадження технологій газифікації вугілля для вироблення електроенергії, комбінованої вироблення тепло- та електроенергії, виробництва паливних елементів, хімічної та спеціалізованої продукції (nd). UNECE https://unece.org/sites/default/files/2021-08/ECE_ENERGY_GE.5_2021_3_r.pdf
24. Сербін С. Порівняльний аналіз способів газифікації вугілля різного морфологічного складу ISSN 2078-774X. Вісник НТУ «ХПІ». 2013. № 13(987). С. 89-93. https://www.kpi.kharkov.ua/archive/2013/13/13_13_12.pdf
25. Гусев С. (1970). Газифікація вугілля в Україні : реальність чи обман. Minprom. <https://minprom.ua/opinion/191632.html> (опубл. 26.09.2015)
26. Екологія економіки у країнах східної сусідства ЄС. (nd.). Проект OECD. <https://www.oecd.org/env/outreach/eapgreen.htm> (опубл. 01.12.2017)
27. Siemens отримав замовлення на постачання до Китаю восьми установок газифікації вугілля потужністю 500 МВт. (опубл. 3.08.2011) <https://www.epravda.com.ua/press/2011/08/3/293766/>
28. Спеціальна доповідь IPCC (ООН про Зміну Клімату). Уловлювання та зберігання двоокису вуглецю. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srcss_spm_ts_ru-1.pdf
29. Повідомлення головного редактора за матеріалами «EUROCOKE SUMMIT 2016». (nd). <https://ukhin.org.ua/ru/?view=article&id=21:soobshchenie-glavnogo-redaktora-po-materialam-eurocoke-summit-2016&catid=15>

Надійшла до редколегії / Received by the editorial board: 01.03.2024

Прийнята до друку / Accepted for publication: 20.03.2024

Коноводов Д.В., Бояркін В.В., Маслов Д.А.

Автоматизований розрахунок параметрів процесу холодної прокатки штаб на безперервних станах

Konovodov D.V., Boiarkin V.V., Maslov D.A.

Automated calculation of cold rolling parameters on continuous rolling mills

Мета. Підвищення точності та швидкості розрахунку режимів обтисків, енергосилових, кінематичних та температурних параметрів процесу холодної прокатки штаб на безперервних станах.

Методика. Аналіз моделей напружень тертя для підвищення рівня працездатності моделі процесу холодної прокатки. Обґрунтування моделі для визначення напружень тертя при холодній прокатці, з метою підвищення точності прогнозування нормальних контактних напружень, енергосилових, кінематичних та температурних параметрів процесу.

Результати. Представлено аналіз моделей напружень тертя, що використовують при розробці програм моделювання процесів обробки металів тиском. Показано, що застосування некоректних моделей напружень тертя, призводить до некоректного визначення нормальних контактних напружень та інших параметрів процесу пластичної деформації. З використанням обґрунтованої математичної моделі запропоновано програму автоматизованого розрахунку параметрів процесу холодної прокатки штаб на безперервних станах.

Наукова новизна. Встановлено застосування некоректних моделей для визначення напружень тертя на контакті валків та штаби в програмах розрахунку процесів обробки металів тиском. Запропоновано програму автоматизованого розрахунку параметрів процесу холодної прокатки штаб на безперервних станах.

Практична значущість. Результати, представлені в роботі, дають можливість використовувати програму автоматизованого розрахунку параметрів процесу холодної прокатки штаб для розробки режимів обтисків на безперервних станах. Використання програми дозволяє приймати рішення про зміну параметрів технології з метою оптимізації та інтенсифікації режимів обтисків на стані.

Ключові слова: холодна прокатка, штаба, напруження тертя, безперервний стан, математична модель, режим обтисків, параметри процесу, програма розрахунку.

Purpose. Increasing the accuracy and speed of deforming modes calculating, power, kinematic and temperature parameters of the cold rolling process on continuous rolling mills.

Methodology. Analysis of friction stress models for cold rolling process model improvement. Justification of the model for frictional stresses determining during cold rolling, to increase the accuracy of forecasting of normal contact stresses, energetic, kinematic and temperature process parameters.

Findings. The analysis of friction stress models used in the development of programs for modeling processes of metal pressure processing is presented. It is shown that the use of incorrect friction stress models leads to an incorrect determination of normal contact stresses and other parameters of the plastic deformation process. With the use of the mathematical model, a program algorithm for automated calculation of the parameters of the cold rolling process is proposed. *Originality.* The use of incorrect models for determining the frictional stresses at the contact of rolls and shafts in the calculation programs of metal pressure processing processes was founded. A program for automated calculation of the parameters of the cold rolling process is proposed.

Practical value. The results presented in the work make it possible to use the program for automated calculation of the parameters of the cold rolling process for the development of deformation modes on continuous rolling mills. Using the program allows to make decisions about technology parameters improvement to optimize and intensify deformation modes on the mills.

Keywords: cold rolling, strip, frictional stress, continuous rolling mill, mathematical model, deformation mode, process parameters, calculation program.

Вступ. Сьогодні у виробництві холоднокатаних штаб актуальними є питання економії металу, енергоресурсів, трудових та інших матеріальних витрат (інструменту, технологічного мастила, кислоти, захисного газу тощо), а також покращення якості та підвищення конкурентоспроможності продукції, що випускається. Крім очевидної доцільності, це викликано ще й значним підвищенням цін на сировину та енергоносії, тенденція до зростання яких у найближчі роки не лише збережеться, а, найімовірніше, посилиться [1].

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Вирішення завдань, пов'язаних з підвищенням ефективності виробництва, збільшенням випуску, розширенням асортименту, покращенням якості та підвищенням конкурентоспроможності холоднокатаного прокату здійснюється, головним чином, за такими напрямками [2, 3]:

- створення нових технологічних процесів та відповідного обладнання для їх реалізації;
- створення інтегрованих (поєднаних) агрегатів для здійснення в одному безперервному потоці кілька технологічних операцій (наприклад, травлення та холодної прокатки, відпалу та дресування);
- реконструкція та підвищення технічних характеристик діючого обладнання;
- удосконалення та оптимізація технологічних процесів на діючому обладнанні;
- удосконалення та оптимізація режимів обтисків та параметрів технології (натягу, шорсткості робочих валків та температурно-швидкісних умов холодної прокатки) на діючих станах;
- застосування нових більш ефективних технологічних мастил;
- застосування ефективних систем регулюван-

на технологічних параметрів та автоматизованого управління технологічним процесом;

- підвищення ролі інформаційного забезпечення, створення та впровадження інформаційних технологій.

Розробка та реалізація конкретного технічного рішення за будь-яким із перерахованих напрямків неможлива без наявності точної та достатньої інформації про відповідний об'єкт, процес, явище або параметр. Досвід передових країн свідчить, що проектування параметрів технології та обладнання станів холодної прокатки, розробка та оптимізація режимів обтисків, створення алгоритмів та систем управління технологічним процесом, прогнозування властивостей та параметрів якості холоднокатаного прокату здійснюється лише на базі точної кількісної інформації про параметри та явища, що характеризують взаємодію штаби з валком.

Отримання такої інформації можливе двома методами – експериментальним чи теоретичним [2]. Експериментальний (статистичний) метод отримання інформації передбачає, що об'єкт (у даному випадку стан холодної прокатки) оснащений відповідними приладами та пристроями для вимірювання та реєстрації, а також апаратурою, методикою та програмою для обробки інформації, її подання та видачі у необхідному вигляді або формі. Інформація, яка отримується таким шляхом, пов'язана з великими витратами часу. До того ж, вона може бути використана тільки на конкретному стані і тільки для конкретних умов, в яких вона була отримана. З цих причин інформацію про процес холодної прокатки доцільно одержувати методами математичного моделювання, оскільки ці методи забезпечують високу точність прогнозування щодо простих засобів і з мінімальними витратами [2]. Для отримання такої інформації необхідні дві умови – наявність математичної моделі та програми для її реалізації.

Головною з двох вищезазначених умов є наявність адекватної математичної моделі процесу холодної прокатки, що має задовільну точність, широкий діапазон працездатності, велику швидкодію і відносну простоту реалізації. Проте, математичні моделі що використовуються в теорії холодної прокатки [4-6], відрізняються обмеженим діапазоном працездатності та недостатньою точністю [2].

В останні десятиріччя для розв'язання фізичних задач, які можуть бути описані диференціальними рівняннями, активно застосовується метод скінчених елементів. Головний недолік методу скінчених елементів полягає в необхідності складання обчислювальних програм і застосування потужної обчислювальної техніки. на високому рівні. Але використання таких програм дозволяє значно скоротити кількість натурних експериментів.

Застосування обчислювальних програм для розв'язання двовимірних та тривимірних задач у процесах обробки металів тиском є перспективним напрямком проектування. Для теоретичного

дослідження процесів обробки металів тиском широко застосовуються програмні комплекси. QForm, Abacus, DForm-3D, ANSIS [7 - 10]. Проблеми моделювання процесу листової прокатки з використанням вищезазначених програм, полягає у необхідності застосовувати велику кількість кінцевих елементів для опису широкої та тонкої штаби в зоні деформації, що значно підвищує час розрахунку.

Розвиток дослідження процесів обробки металів тиском, зокрема листової прокатки, привів до появи ряду інших програмних продуктів, орієнтованих на користувача-технолога. Розробка технологічних процесів за допомогою таких програм виконується більш якісно, ніж традиційними методами проб та помилок. Відомі досягнення в цьому напрямку колективу Інституту чорної металургії НАН України [11].

Однак використання в алгоритмах вищезгаданих програм, які, в тому числі, базуються на методі скінчених елементів, необґрунтованих моделей для опису напружень тертя на контакті штаби та інструменту, призводить до зниження точності прогнозування параметрів процесу холодної деформації штаб.

Мета і завдання досліджень. Метою дослідження є розробка програми автоматичного розрахунку параметрів процесу холодної прокатки штаб, яка базується на адекватній інженерній моделі процесу холодної прокатки, що дозволяє прогнозувати параметри процесу прокатки на безперервних станах швидко та з високою точністю.

Матеріали та методи дослідження. Аналіз моделей процесу холодної прокатки штаб показав, що рівень і характер розподілу напружень тертя на контактній поверхні штаби з валком є одним з факторів, що надають вирішальний вплив на точність прогнозування енергосилових, кінематичних та температурних параметрів. Тому наявність відповідної моделі розрахунку напружень тертя є необхідною умовою при теоретичному визначенні параметрів і розробці математичних моделей процесу прокатки. Накопичений досвід показав, що більшість з моделей тертя, що застосовуються, не мають достатнього фізичного обґрунтування, відрізняються низькою точністю та обмеженим діапазоном працездатності.

Для прогнозування напружень тертя при прокатці запропоновано кілька десятків моделей. Найбільше поширення отримали моделі:

$$\tau_x = f p_x \quad (1)$$

$$\tau_x = f_\sigma k \quad (2)$$

де f, f_σ, p_x, k - відповідно коефіцієнт тертя, показник тертя, нормальне напруження та середнє значення опору зсуву матеріалу штаби в перерізі осередку деформації, що розглядається.

Моделі (1) та (2) помилково називають відповідно законами Амонтона-Кулона та Зібеля [12]. Модель (2) є окремим випадком моделі (1) оскільки ($\tau_x = f p_x = f n_\sigma k_x$) утворюється з неї при $n_\sigma = 1,0$ та $k_x = k$. З цієї причини модель (2) повинна розглядатися тільки як наближена, або як припу-

щення, і не є законом. Назва моделі (1) також необґрунтована, оскільки модель Амонтона – Кулона запропонована для визначення інтегральної величини опору (сили тертя T), що відповідає початку руху (ковзання) одного твердого тіла відносно іншого, які до того перебували у стані спокою:

$$T = f \cdot N \quad (3)$$

де f , N – коефіцієнт тертя та нормальна сила.

Використання залежності (3) для прогнозування значень та характеру розподілу напруги тертя при прокатці, записавши її у вигляді (1), тобто. використання інтегральної характеристики (сили) тертя визначення напружень тертя без додаткової інформації характер їх розподілу, представляється необґрунтованим. З використанням залежності (3) може бути визначена тільки середня величина напруги тертя τ_{cp} при припущенні, що нормальні напруження розподілені рівномірно і дорівнюють середнім.

Відомі інші моделі напружень тертя, які створені на основі аналізу наявних експериментальних даних про напруження тертя [13 – 15]. Оскільки експериментальні епюри напружень тертя не відображають весь спектр умов реального процесу прокатки, очевидно, що створені на їх основі моделі мають обмежену область застосування. Слід зазначити, що ці моделі містять емпіричні константи, визначення яких представляє самостійне завдання. Разом з тим застосування таких моделей відкриває потенційні можливості для уточнення

$$l_c = x_1 + \sqrt{R\Delta h + x_1^2} \quad (5)$$

$$\text{де } x_1 = x_{1п} + 6 \frac{1-v_B^2}{\pi E_B} p_{cp} R \left(1 - 2 \left(\frac{x_{1п}}{l_c} \right) \right) \left[4 \left(\frac{x_{1п}}{l_c} \right) \left(1 - \left(\frac{x_{1п}}{l_c} \right) \right) + 1 \right]; \quad (6)$$

середнього нормального контактного напруження [17]

$$p_{cp} = \frac{1,15}{2(1-v_B^2)} \left(\sigma_{T0} \xi_0 \frac{x_{0п}}{l_c} + \sigma_{T1} \xi_1 \frac{x_{1п}}{l_c} \right) + \frac{1,15 \sigma_{фр} \xi_{cp}}{1-v_B^2} \left[1 + \frac{f l_B}{3 h_{cp}} (1 + 0,5 \varepsilon) \right] \frac{l_B}{l_c}; \quad (7)$$

середньої величини опору деформації матеріалу штаби [18]

$$\sigma_{фр} = \sigma_{Tср} k_{tcp} k_{ucp}; \quad (8)$$

температури штаби на виході з осередку деформації [11]

$$t_{1B} = t_{0B} + (t_{0п} + \Delta t_{дп} + \Delta t_{трп} - t_{0B}) \exp \left[- \frac{4}{\rho_{п} c_{п} (h_0 + h_1)} \sqrt{\frac{\lambda_B \rho_B c_B l_c}{\pi V_1}} \right]; \quad (9)$$

сили прокатки [16]

$$P_c = p_{cp} l_c b \quad (10)$$

У моделях 1 - 4 прийняті позначення: R , Δh , ε – радіус робочих валків, абсолютний та відносний частковий обтиск; $x_{0п}$, l_B , $x_{1п}$ – відповідно, довжина ділянок пружного стиску, пластичної деформації та пружного відновлення штаби; E_B , v_B , $v_{п}$ – модуль пружності, коефіцієнт Пуассона матеріалу валків та штаби; $t_{0п}$, t_{0B} – температура штаби та валків на вході в осередок деформації; $\Delta t_{дп}$, $\Delta t_{трп}$ – величина збільшення температури штаби від роботи формозміни та сил тертя на виході з осередку деформації; λ_B , ρ_B , c_B , $\rho_{п}$, $c_{п}$ – відповідно, коефіцієнт теплопровідності, густина та теплоємність матеріалу робочих валків та штаби; h_0 , h_{cp} , h_1 – початкова, середня та кінцева товщина штаби; f , b , V_1 – коефіцієнт тертя, ширина та швидкість штаби на виході з осередку деформації; ξ_0 , ξ_1 , ξ_{cp} – відповідно, коефіцієнт заднього та переднього натягіння,

вирішення завдань щодо визначення параметрів процесу прокатки.

Використання необґрунтованих моделей для розрахунку напружень тертя, знижує точність та обмежує діапазон працездатності теоретичних рішень і математичних моделей процесу.

У роботі [12] запропоновано модель напружень тертя, яка враховує особливості кінематичної взаємодії штаби з валком при холодній прокатці:

$$\tau_{x;y} = -f p_{x;y} \frac{V_{скх;y}}{|V_{скх;y}^n|} \quad (4)$$

де $p_{x;y}$, $V_{скх;y}$, $V_{скх;y}^n$ – нормальне контактне напруження в даній точці, вектор швидкості ковзання даної точки в аналізованому перерізі і вектор швидкості ковзання в цьому перерізі на межі контактної поверхні штаби з валком, тобто на бічній поверхні штаби, або в перерізах входу та виходу останньої з валків.

Колективом авторів під керівництвом проф. Василева Я. Д., з урахуванням запропонованої моделі напружень тертя, було розроблено математичну модель процесу холодної прокатки, яка враховує особливості силової, фрикційної та температурно-швидкісної взаємодії валків та штаби, а також вплив пружних деформацій валків та штаби. Модель відрізняється відносною простотою та високою точністю.

В основу моделі покладено наступні залежності для визначення:

довжини дуги контакту штаби з валком [16]

їх середня величина; σ_{T0} , σ_{T1} – межа текучості матеріалу штаби на вході та виході з осередку деформації, з урахуванням зміцнення та температури; $\sigma_{Tср}$ – середнє значення опору деформації, розраховано з урахуванням зміцнення матеріалу штаби; k_{tcp} , k_{ucp} – коефіцієнти, що враховують вплив середньої температури та середньої швидкості деформації на опір деформації матеріалу штаби при холодній прокатці. Повністю концепція моделі процесу холодної прокатки наведена у роботі [3].

Результати дослідження. На базі математичної моделі процесу холодної прокатки було розроблено алгоритм розрахунку режимів обтискання на безперервних станах холодної прокатки та створено програму «Тандем 1680» для його реалізації. При розробці алгоритму та програми враховано технологічні обмеження та передбачено процеду-

ру, яка визначає умови прокатки для реалізації режимів обтиску на конкретному стані.

Робота програми вимагає введення вихідних даних про параметри обладнання стану, режими обтискання та натягу, а також відомостей про властивості матеріалу штаби та валків. Програма дозволяє отримувати інформацію про енергосилові, кінематичні та температурні параметри процесу холодної прокатки та годинної продуктивності стану. З її допомогою можна приймати рішення про

зміну параметрів технології з метою оптимізації та інтенсифікації режимів обтиску на стані.

Працездатність та точність програми перевірено на безперервних станах холодної прокатки Казахстану та України.

У таблиці 1, як приклад, наведені результати розрахунку енергосилових параметрів при прокатці штаби перерізом 0,8x1000 мм на безперервному 4-х клітьовому стані та штаби перерізом 0,55x1015 мм на безперервному п'ятиклітьовому стані.

Таблиця 1 - Режими обтисків та енергосилові параметри при холодній прокатці штаб на чотириклітьовому стані 1680 комбінату «Запоріжсталь» і на п'ятиклітьовому стані 1700 Карагандинського металургійного комбінату.

№ кл	h_0 , мм	ε	q_1 , $\frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$	V_1 , м/с	$\sigma_{\text{фср}}$, $\frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$	f	l_c , мм	$t_{\text{п1}}$, °С	$p_{\text{срс}}$, $\frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$	P_c , МН	$M_{\text{дв}}$, кН·м	$N_{\text{дв}}$, кВт
1	2	3	5	6	7	8	9	10	11	12	15	16
Режим 1. Прокатка штаби 0,8x1000 мм з підкату 2,7x1000 мм на 4-х клітьовому стані 1680 «Запоріжсталь» (сталь 08кп; $\sigma_T=240+34,6(100\varepsilon)^{0,62}$)												
1	2,70	0,388	149	3,63	478	0,106	19,0	97	682	12,98	138,0	1818
2	1,65	0,260	155	4,91	592	0,051	12,7	123	618	7,86	87,8	1756
3	1,22	0,262	165	6,65	621	0,050	11,5	145	672	7,76	74,1	1955
4	0,90	0,111	40	7,48	631	0,071	8,5	152	709	6,04	57,1	1661
Режим 2. Прокатка штаби 0,55x1015 мм з підкату 2,5x1015 мм на 5-ти клітьовому стані 1700 КарМК (сталь 08кп; $\sigma_T=300+34,6(100\varepsilon)^{0,6}$)												
1	2,500	0,220	155	2,99	494	0,106	16,1	78	654	10,65	50,6	480
2	1,950	0,360	160	4,67	608	0,060	17,6	119	677	12,09	190,0	2850
3	1,248	0,275	150	6,44	659	0,056	13,6	144	764	10,54	117,3	2443
4	0,905	0,255	136	8,65	686	0,054	12,1	163	846	10,40	90,9	2525
5	0,674	0,184	40	10,60	702	0,071	10,9	179	985	10,85	77,4	2661

* q_1 – переднє питоме натягіння; $M_{\text{дв}}$, $N_{\text{дв}}$ – момент та потужність двигуна.

Величина заднього питомого натягіння прийнята $q_0=20 \text{ Н/мм}^2$.

Обговорення результатів. Аналіз даних представлених в таблиці 1 показав, що програма розрахунку режимів обтисків дозволяє прогнозувати параметри холодної прокатки на діючих безперервних станах з досить високою точністю та в широкому діапазоні умов деформації, що реалізуються на практиці. При розрахунку режимів обтисків враховано параметри діючого обладнання, дані про механічні властивості штаб, що виробляються в умовах конкретного підприємства, застосовувані технологічні мастила, режими натягіння та інші параметри технології. Результати розрахунку енергосилових параметрів відповідають наявним у технічній літературі експериментальним даним.

Бібліографічний опис

1. Василев Я.Д., Самокиш Д.М., Журавльова С.В., Проїдак Ю.С., Замогильний Р.О. Стан виробництва тонкого плоского сталевих проката у світі і тенденції розвитку штабових станів холодної прокатки. Теорія і практика металургії. 2019. №1. С. 15–28. DOI:https://doi.org/10.34185/tpm.1.2019.02
2. Василев Я.Д., Проїдак Ю.С., Бондаренко О.А., Самокиш Д.М., Петльований Є.О. Стан виробництва та споживання плоского холоднокатаного прокату з вуглецевої сталі із захисними покриттями в Україні. Метал та лиття України. 2020. Vol. 28. № 2 (321). С. 77 – 84.
3. Научные основы эффективных технологий производства тонкостенной длинномерной металлопродукции / Я.Д. Василев, В.У. Григоренко, В.Н. Данченко и др. Днепропетровск: РВА «Дніпро-ВАЛ», 2002. 353с.
4. Целиков А.И. Никитин Г.С., Рокотян С.Е. Теория продольной прокатки. Москва: Металлургия, 1980. 320с.
5. Луговой В.М. Алгоритмы систем автоматизации листовых станов. Москва: Металлургия, 1974. 320 с.
6. Химич Г.Л., Цолюк М.Б. Оптимизация режимов холодной прокатки на ЭЦВМ. Москва: Металлургия, 1973. – 256 с.

Висновки. Розроблено програму розрахунку режимів обтисків та енергосилових параметрів на безперервних станах холодної прокатки штаб, що дозволяє отримувати точні дані про енергосилові, кінематичні та температурні параметри процесу. За допомогою програми можна приймати рішення про зміну параметрів технології з метою оптимізації та інтенсифікації режимів обтисків на стані.

Працездатність та точність програми перевірено на безперервних станах холодної прокатки. Програма розрахунку режимів обтисків може бути використана для розробки систем автоматичного управління технологічним процесом холодної прокатки на безперервних станах.

7. <https://www.qform3d.com/>
8. <https://www.ansys.com/>
9. <https://www.3ds.com/products/simulia/abaqus>
10. <https://www.deform.com/products/deform-3d/>
11. Приходько И. Ю. Системы компьютерного моделирования и управления процессами тонколистовой прокатки Института черной металлургии. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. Днепропетровск.: ИЧМ НАН Украины, 2014. Вип. 29. С. 153 – 169.
12. Василев Я.Д., Дементенко А.В., Коноводов Д.В. Анализ моделей напряжений трения при прокатке. Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії та машинобудуванні: Тематичний зб. наук. праць. Краматорськ, 2001. С. 532 – 537.
13. Грудев А.П. Внешнее трение при прокатке. Москва: Металлургия, 1973. 288 с.
14. Зильберг Ю.В. Методы расчета сил трения при прокатке. *Обработка металлов давлением*: Сб. трудов ДМетИ. Москва: Металлургия, 1972. № 58. С. 291 – 296.
15. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением / Леванов А.Н., Колмогоров В.Л. Буркин С.П., Картак Б.Р., Ашпур Ю.В., Спасский Ю.И. Москва: Металлургия, 1976. 416 с.
16. Vasilev, Y., Samokish, D., Bondarenko, O., Mospan, N. Determination of Particular Relative Reduction in Cold Rolling of Thin and Extra Thin Strips to Implement the Process with the Least Force. *Science and Innovation*. 2022. V. 18(3). pp. 49 – 57.
<https://doi.org/10.15407/scine18.03.049>
17. Василев Я.Д. Инженерная модель средних нормальных контактных напряжений при холодной прокатке / Я.Д. Василев, Д.В. Коноводов, А.В. Дементенко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2006. – №1. – С. 46 – 48.
18. Василев Я.Д. Сопrotivление деформации материала полосы при холодной прокатке / Я.Д. Василев, Д.В. Коноводов, А.В. Дементенко, Э.Я. Василев // Известия вузов. Черная металлургия. – 2007. – №1. – С. 27 – 31.

References

1. Vasylev Ya.D., Samokysh D.M., Zhuravlova S.V., Proidak Yu.S., Zamohylnyi R.O. Stan vyrobnytstva tonkoho ploskoho stalevoho prokata u sviti i tendentsii rozvytku shtabovykh staniv kholodnoi prokatky. *Teoriia i praktyka metalurhii*. 2019. №1. S. 15 – 28. DOI:<https://doi.org/10.34185/tpm.1.2019.02>
2. Vasylev Ya.D., Proidak Yu.S., Bondarenko O.A., Samokysh D.M., Petlovanyi Ye.O. Stan vyrobnytstva ta spozhyvannia ploskoho kholodnokatanoho prokata z vuhletsevoi stali iz zakhysnymy pokryttiamy v Ukraini. *Metal ta lyttia Ukrainy*. 2020. Vol. 28. № 2 (321). С. 77 – 84.
3. Nauchnye osnovy effektivnykh tekhnolohiy proyzvodstva tonkostennoi dlynnomernoi metalloproduksyy / Ya.D. Vasylev, V.U. Hryhorenko, V.N. Danchenko y dr. Dnepropetrovsk: RVA "Dnipro-VAL", 2002. 353s.
4. Tselykov A.Y. Nyktytn H.S., Rokotian S.E. *Teoriya prodolnoi prokatky*. Moskva: Metallurhiya, 1980. 320s.
5. Luvovskoi V.M. Alhorytmy system avtomatyzatsyy lystovykh stanov. Moskva: Metallurhiya, 1974. 320 s.
6. Khymych H.L., Tsoliuk M.B. Optymyzatsiya rezhymov kholodnoi prokatky na ETsVM. Moskva: Metallurhiya, 1973. – 256 s.
7. <https://www.qform3d.com/>
8. <https://www.ansys.com/>
9. <https://www.3ds.com/products/simulia/abaqus>
10. <https://www.deform.com/products/deform-3d/>
11. Prykhodko Y. Yu. Systemy kompiuternoho modelyrovanyia y upravleniia protsessamy tonkolystovoi prokatky Instytutu chernoi metallurhyy. Fundamentalnye y prykladnye problemy chernoi metallurhyy: Sb. nauchn. tr. Dnipropetrovsk.: IChM NAN Ukrainy, 2014. Vyp. 29. S. 153 – 169.
12. Vasylev Ya.D., Dementyenko A.V., Konovodov D.V. Analiz modelei napriazhenyi treniia pry prokatke. Udoshkonalennia protsesiv ta obladnannia obrobky tyskom v metalurhii ta mashynobuduvanni: Tematychnyi zb. nauk. prats. Kramatorsk, 2001. S. 532 – 537.
13. Hrudev A.P. Vneshnee trenye pry prokatke. Moskva: Metallurhiya, 1973. 288 s.
14. Zylberh Yu.V. Metody rascheta syl treniia pry prokatke. Obrabotka metallov davlenyem: Sb. trudov DMetY. Moskva: Metallurhiya, 1972. № 58. С. 291 – 296.
15. Kontaknoe trenye v protsessah obrabotky metallov davlenyem / Levanov A.N., Kolmohorov V.L. Burkyn S.P., Kartak B.R., Ashpur Yu.V., Spasskyi Yu.Y. Moskva: Metallurhiya, 1976. 416 s.
16. Vasilev, Y., Samokish, D., Bondarenko, O., Mospan, N. Determination of Particular Relative Reduction in Cold Rolling of Thin and Extra Thin Strips to Implement the Process with the Least Force. *Science and Innovation*. 2022. V. 18(3). pp. 49–57.
17. Vasylev Ya.D. Inzhenernaia model srednykh normalnykh kontaktnykh napriazhenyi pry kholodnoi prokatke / Ya.D. Vasylev, D.V. Konovodov, A.V. Dementyenko // Metallurhicheskaia y gornorudnaia promyshlennost. – 2006. – №1. – S. 46 – 48.
18. Vasylev Ya.D. Soprotivlenye deformatsyy materyala polosy pry kholodnoi prokatke / Ya.D. Vasylev, D.V. Konovodov, A.V. Dementyenko, E.Ia. Vasylev // Yzvestiya vuzov. Chernaia metallurhiya. – 2007. – №1. – S. 27 – 31.

Надійшла до редколегії / Received by the editorial board: 01.03.2024

Прийнята до друку / Accepted for publication: 20.03.2024

УДК 669.184:658.012.011.66

<https://doi.org/10.34185/tpm.1.2023.09>

Величко О.Г., Волкова О.І., Джохуа Чжан

Коливальні явища та вібрація конвертера газокисневого рафінування

Velychko O.G., Volkova E.I., Jiang Zhouhua

Oscillatory phenomena and vibration of the converter for gas-oxygen refining

Анотація. Для технології газокисневого рафінування виконано аналіз «холодного» та «гарячого» моделювання продування металу киснем через донні фурми. Показано вплив технологічних параметрів (інтенсивності продування, числа донних фурм, їх розміщення у днищі) на коливання ванни, утворення хвиль на поверхні ванни та вібрацію конвертера газокисневого рафінування GOR. Вивчено амплітудно-частотні характеристики вібропереміщень та віброшвидкості GOR конвертера. Запропоновано та випробувано в конвертері GOR організацію комбінованої подачі дуття, що дозволяє знизити вібрацію конвертерного агрегату як у періоди продування киснем, так і при продуванні сумішшю аргон-кисень. Встановлено, що рівень віброшвидкості в частотному діапазоні 4–8 Гц визначає динаміка коливальних процесів при виділенні газових об'ємів, а рівень вібропереміщень на частоті менше 1 Гц пов'язаний із коливаннями ванни та поверхневими хвилями.

Ключові слова: конвертер газокисневого рафінування, GOR, донне та комбіноване продування, коливання, вібрація.

Abstract. For gas-oxygen refining technology, analysis of "cold" and "hot" modeling of blowing metal with oxygen through bottom lances was performed. The influence of technological parameters (blowing intensity, number of bottom lances, their placement in the bottom) on bath oscillations, formation of waves on the bath surface, and vibration of the GOR gas-oxygen refining converter is shown. The amplitude-frequency characteristics of vibration movements and vibration speed of the GOR converter were studied. The organization of combined blowing supply was proposed and tested in the GOR converter, which allows to reduce the vibration of the converter unit both during periods of oxygen purging and when purging with an argon-oxygen mixture. It was established that the level of vibration speed in the frequency range of 4–8 Hz determines the dynamics of oscillatory processes during the release of gas volumes, and the level of vibration movements at a frequency of less than 1 Hz is associated with vibrations of the bath and surface waves.

Key words: gas-oxygen refining converter, GOR, bottom and combined blowing, oscillations, vibration.

Вплив способу подачі дуття на коливання металеві ванни.

Спеціальні технології виплавки нержавіючої сталі в агрегаті газокисневого рафінування – ГКР передбачають продування технологічними газами (киснем, сумішами азот (аргон)- кисень, аргон) зверху та через донні фурми, лише через донні фурми [1-4]. Незалежно від способів підведення дуття фізико-хімічні процеси в ході плавки мають виражений коливальний характер, що знаходить прояв у вібрації конвертера.

Вплив продування на металеву ванну визначає сумарний імпульс струменів, що впроваджуються, вдуваного газу ($\Sigma i_{\text{стр}}$) і спливаючих вертикально газових бульбашок ($\Sigma i_{\text{пвз}}$). На рисунку 1 зіставлені напрямки векторів імпульсу струменя, що впроваджується ($i_{\text{стр}}$) і бульбашок газу ($i_{\text{пвз}}$), що вертикально піднімаються при різних способах подачі дуття (зверху, знизу).

При продуванні зверху вектор імпульсу кисневого струменя ($i_{\text{стр}}$), що впроваджується, спрямований вниз по осі нахилу сопла до вертикалі фурми. Вектор імпульсного впливу спливаючих вертикально бульбашок монооксиду вуглецю ($i_{\text{пвз}}$) спрямований нагору (рис. 1).

Таким чином, особливістю подачі дуття зверху і

взаємодії його з металеві ванною є протилежна спрямованість векторів імпульсу кисневого струменя, що впроваджується, і імпульсу спливаючих вертикально газових бульбашок монооксиду вуглецю. Останнє, певною мірою, служить поясненням невеликих по амплітуді коливань металеві ванни при верхній продувці і відповідно невисокої вібрації кисневого конвертера.

Розташування по колу в металеві ванні реакційних зон впровадження кисневих потоків прийнято вважати найбільш раціональним не лише з точки зору рафінування металу, а й мінімізації коливань конвертерної ванни.

При донній продувці (рис.1) вектор імпульсу струменя газу, що впроваджується, спрямований вгору і збігається з вектором імпульсу вертикально спливаючих бульбашок газу. Односпрямованість та складання цих імпульсів посилює вплив продування на ванну і призводить до коливань ванни більшої амплітуди, утворення поверхневих хвиль, що супроводжується інтенсивною вібрацією конвертера з донним продуванням.

Сумарна енергія, що витрачається на перемішування ванни, у тому числі на утворення поверхневих хвиль, включає енергію струменів газу, що вдується, і енергії, що спливають з глибини h бу-

льбашок (CO , N_2 , Ar), які формуються в зоні вдування. Відповідно до розрахунків, енергія перемішування спливаючими бульбашками і від струменів, що впроваджуються, становить, відповідно, 15-25 і 2-3 кВт/т. Таким чином, перемішування та хвилеутворення на поверхні визначає енергія спливаючих бульбашок. Величина останньої пов'язана з інтенсивністю утворення та виділення газових бульбашок та глибиною h , на якій вони формуються і з якої спливають.

При верхній і донній продувці з урахуванням глибини проникнення газових струменів в метал, глибину, з якої спливають бульбашки, можна приймати рівною половині глибини ванни в спокійному стані, а висока інтенсивність перемішування і формування поверхневих хвиль при донному продуванні пов'язані з односпрямованістю потоків струменів, що впроваджуються, бульбашок газу і складанням, в цьому випадку, енергії, що вводиться. Середня потужність перемішування ванни при донному продуванні киснем оцінено в 1,5 рази, а азотом або аргонном у 3-3,5 рази більше, ніж при продуванні киснем зверху. При інтенсивному донному продуванні азотом або аргонном величина сумарної енергії, що підводиться, може досягати 60-80 кВт/т [5].

Вібрація конвертерного агрегату, критичної амплітуди, характерна для донного продування кис-

нем, стала однією з причин відмови від практичного використання подачі кисневого дуття через донні фурми. У конвертері газокисневого рафінування (ГКР) донну продувку ведуть з інтенсивністю значно меншою, ніж у конвертері ОБМ.

Моделювання хвилеутворення методами «холодного» та «гарячого» моделювання

Скориставшись можливостями «холодного» моделювання вивчено взаємодію кисневих струменів, що вдмухаються через донні фурми, рух поверхневих хвиль та зміну рівня ванни при цьому [5]. Ці дослідження були продовжені авторами стосовно виплавки нержавіючої сталі в агрегатах конвертерного типу AOD і ГКР.

Дослідження особливостей хвилеутворення при донному продуванні проводили на водяних прозорих моделях конверторів, виконаних у масштабах 1:12 та 1:24. Рідку ванну моделювали водою, кисневе дуття - повітрям. При цьому витримували на моделі та зразку рівність видозміненого числа Ньютонів Ne'

$$Ne' = \sum i / (\rho_{\text{ж}} \cdot q H D^2), \quad (1)$$

де $\sum i$ – сумарний імпульс газових струменів у місці впровадження їх у ванну, кг м/с²; $\rho_{\text{ж}}$ – густина рідкої ванни, кг/м³; q – прискорення сили тяжіння, м/с²; H і D – глибина та діаметр конверторної ванни, м.

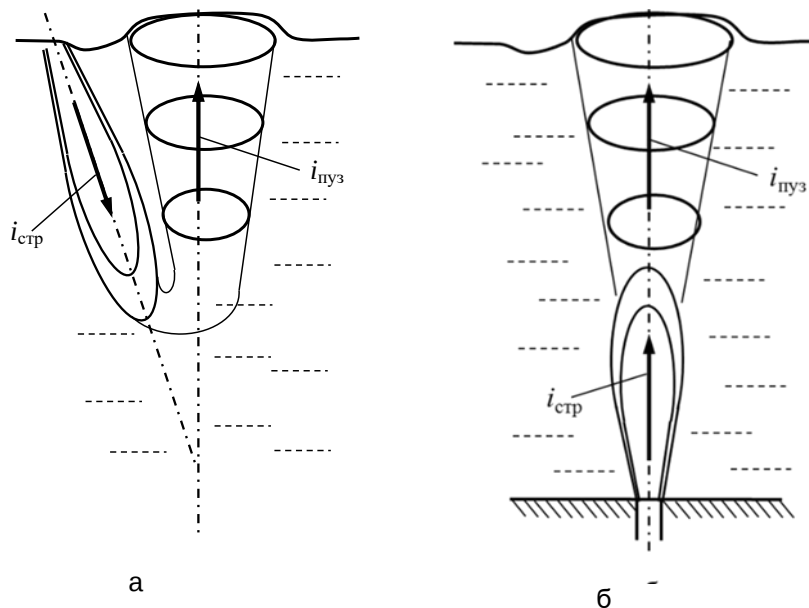


Рисунок 1. Напрямки вектора імпульсів струменя, що впроваджується, і бульбашок газу, що піднімаються, при продуванні зверху (а), знизу (б)

Встановлено, що рівень ванни при донному продуванні коливається від максимального в одній частині моделі конвертера до мінімального у протилежній частині (рис. 2).

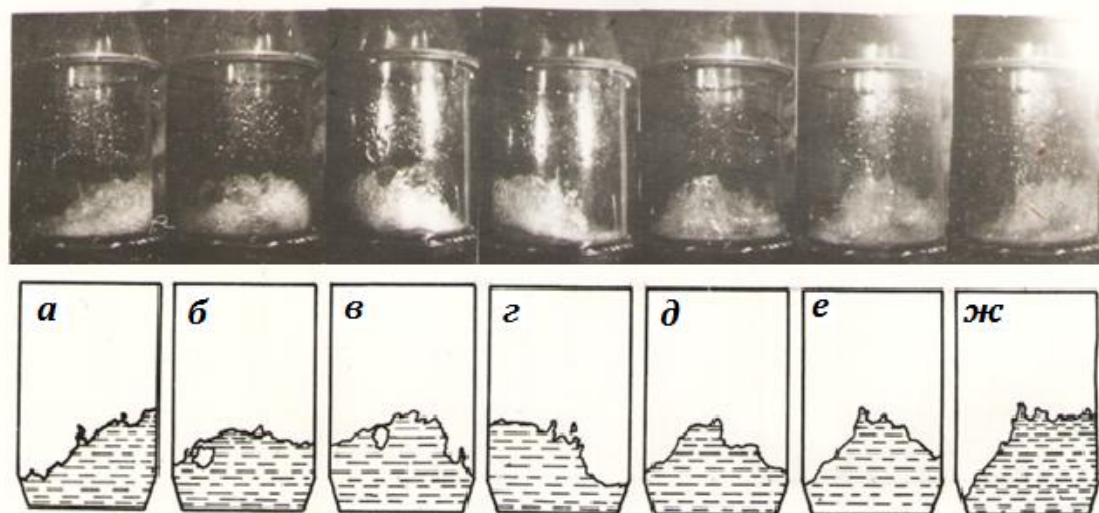


Рисунок 2. Характерна картина (I) та схема (II), зміни рівня ванни протягом одного циклу при донній подачі дуття: а-ж - фази коливання з інтервалом $1/6$ періоду [6].

Рідина в моделі являє собою певну коливальну систему. При виведенні її з рівноваги рух рідини можна розглядати подібним коливанням математичного маятника. Якщо останній відхилити від положення рівноваги, то під дією сили тяжіння формується сила, що повертає, спрямована в протилежний бік від зміщення.

Для металеві ванни виведення її з рівноваги супроводжується утворенням поверхневих хвиль і біля стінки, де рівень підйому металу максимальний, виникають сили, що повертають, спрямовані в протилежний бік від стінки. Як результат виникають коливальні рухи металу від стінки до стінки подібно до коливання рідини між вертикальними площинами. У кожний момент часу хвиля має вигляд косинусоїди. Максимальна висота підйому та мінімальні западини будуть однакові.

Автори [5] встановили, що частота коливань поверхні ванни збігається з формою і частотою f_c основного струменю власних гравітаційних коливань рідини в циліндричній посудині.

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{3.68 \cdot \frac{g}{D_B}} \cdot \ln \left(3.68 \cdot \frac{H}{D} \right), \text{Гц} \quad (2)$$

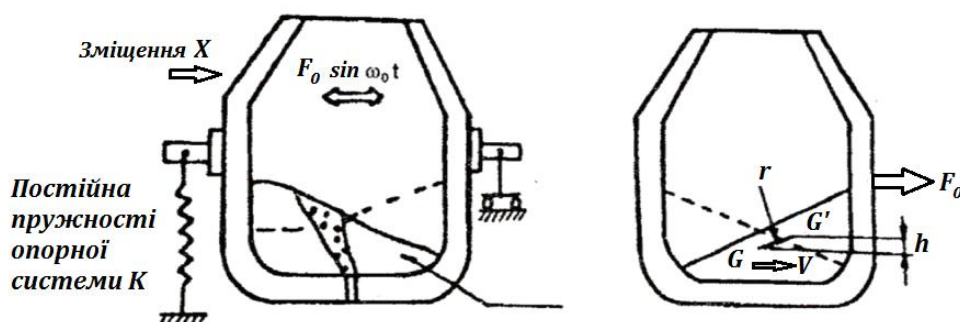


Рисунок 3. Схема моделі низькочастотних коливань ванни та корпусу конвертера при донному продуванні.

Як видно із рис. 3 виникнення сили F_0 пов'язують з коливаннями рідкої фази та зміщенням по радіусу r центру тяжкості конвертерної ванни.

де H і D – глибина та діаметр ванни, м. Для 100-150 т конвертерів $f_c = 0.45$ Гц

Отримані результати на «холодних» моделях добре корелюють з математичною моделлю коливальних явищ при донній продувці, запропонованої у роботі [6] (рис. 3). Відповідно до неї, вібропереміщення по осі цапф конвертера та характерна частота коливань F_0 описуються рівняннями:

$$X = c \cdot \sin(\omega_1 \cdot t) + \frac{F_0}{M(\omega_1^2 - \omega_0^2)} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t) \quad (3)$$

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (4)$$

де c – деяка величина; t – час, M – маса конвертера, F_0 – величина сили, що викликає вібрацію (максимальна), ω_0 і ω_1 – характерна та власна кутова частота вібрації, K – постійна пружності опорної системи.

$$\omega_0^2 = \frac{K \cdot q}{R} \cdot \tan \cdot h \cdot \frac{K \cdot H}{R} \quad (5)$$

де K – постійна ($K=1.84\dots$), R – внутрішній радіус конвертера, H – глибина ванни, g – прискорення вільного падіння

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} \quad (6)$$

збільшення інтенсивності продування призводить до посилення хвилеутворення, коливань ванни та вібрації.

Спосіб розміщення фурм та характер руху хвиль у конвертері.

Вивчено вплив способу розміщення фурм у днищі на характер руху хвиль у конвертері [5]. При розміщенні фурм у ряд (рис. 4а) виникають стійкі хвилі в площині перпендикулярної осі розміщення фурм. Симетричне розміщення фурм у центральній частині днища по колу призводить до рівномірного у всіх напрямках зворотно-поступального руху хвиль на поверхні ванни (рис. 4б). При розмі-

щенні фурм двома симетричними групами (рис. 4в) спостерігається утворення двох гребенів хвилі, які рухаються в протилежних напрямках, одночасно ударяючись об стінки конвертора або зустрічаючись у центрі ванни.

Продування ванни в режимі, що визначається значеннями $Ne' > 3 \cdot 10^{-2}$, призводить до зміни характеру руху хвилі в конвертері. Незалежно від кількості та способу розміщення фурм у його днищі спостерігається круговий рух хвилі (рис. 4 г). Такий режим продування характеризується особливо значним розгойдуванням моделі конвертера.

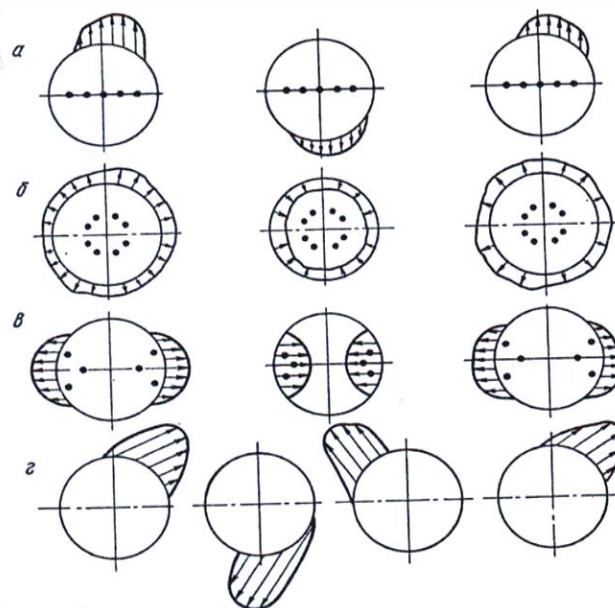


Рисунок 4. Схеми руху хвиль, що спостерігаються, залежно від варіанта розміщення фурм у днище конвертора та видозміненого числа Ньютона; (а, б, - $Ne' < 2 \cdot 10^{-2}$, г- $Ne' > 3 \cdot 10^{-2}$. Інтервал за часом між фазами $\frac{1}{2}$ періоду (а-в) і $\frac{1}{3}$ періоду (г)) [6].

Встановлено, що розміщення донних фурм по колу (варіант б на рис.4) або по еліпсу забезпечує мінімальну амплітуду поверхневих хвиль, що формуються. Зі збільшенням кількості донних фурм (великим розосередженням дуття) зменшується питома витрата дуття на одну фурму, що зменшує коливання ванни та вібрацію конвертерного агрегату. У цьому слід забезпечити не злиття реакційних зон.

На рис. 5 і 6 представлені результати В.І.Баптизмаського та В.І.Трубавіна щодо «гарячого» моделювання та зображення реакційних зон, що утворюються при продуванні киснем через одиночні сопла донні і близько розташовані сопла високовуглецевого розплаву з вмістом 3,8% вуглецю і залежність розмірів реакційних зон від параметрів дуття до і після їх злиття. Злиття реакційних зон при продуванні через близько розташовані фурми призводить до різкого стрибкоподібного

збільшення параметрів реакційної зони і може розглядатися близьким характером взаємодії до продування через одну фурму більшого діаметру.

Злиття реакційних зон істотно впливає, в першу чергу, на поведінку конверторної ванни, призводить до посилення хвилеутворення на поверхні, коливань і вібрацій конвертерного агрегату GOR.

Комбінована подача кисню через верхню фурму і через донні дутьові пристрої.

Результати «холодного» та «гарячого» моделювання використовували при виборі числа сопел у днищі конвертера GOR та раціональному їх розміщенні у днищі. Разом з тим вібрація конвертера GOR зберігалася суттєвою і були потрібні додаткові заходи щодо її зниження. В якості альтернативи суто донного продування киснем в конвертері ГРП запропонована комбінована подача кисню через верхню фурму і через донні дутьові пристрої.

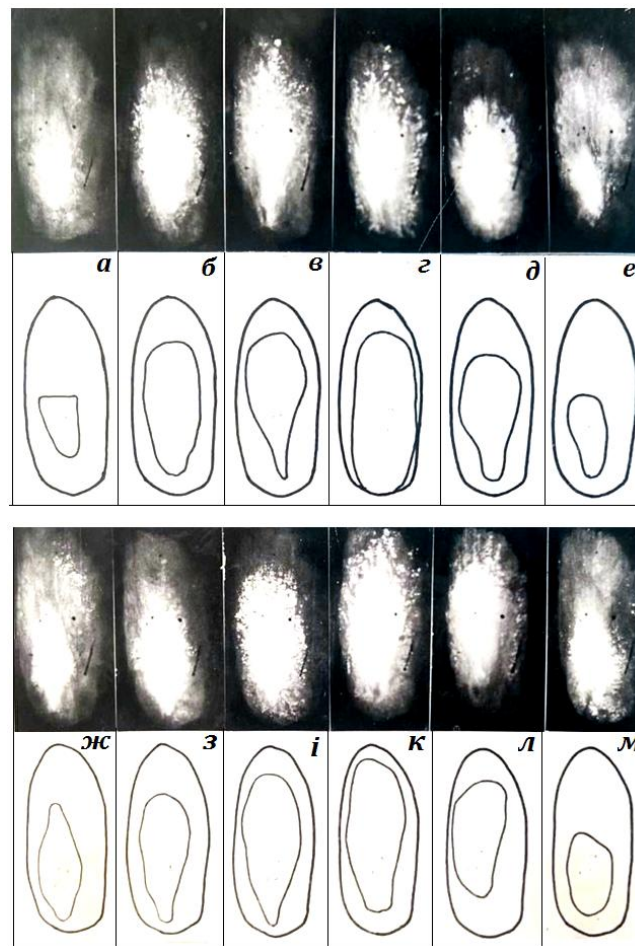


Рисунок 5. Зображення реакційної зони, зафіксовані кінозйомкою через 1/32 сек. ($[C] = 3,0\%$, $d_c = 2,2$ мм)

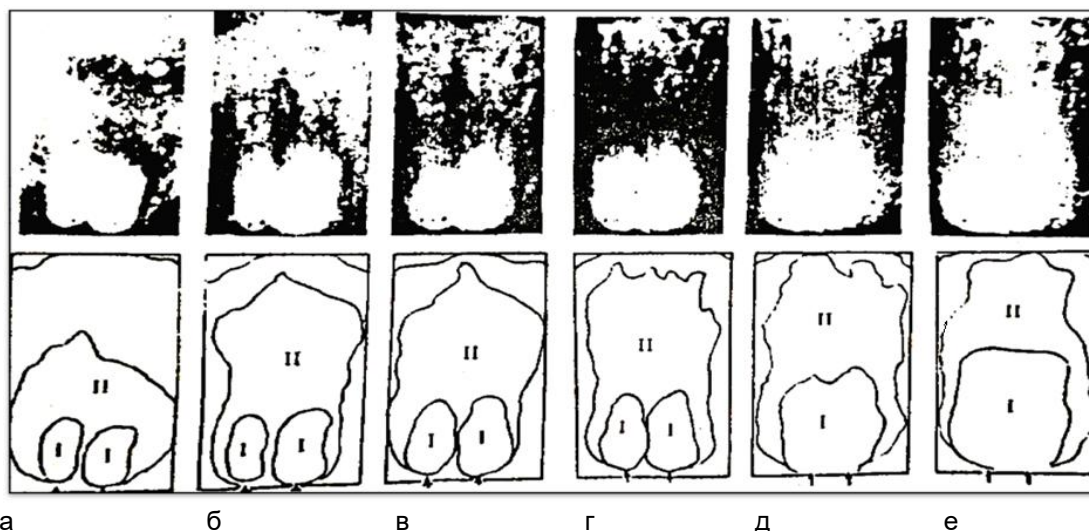


Рисунок 6. Зображення первинних (I) і вторинних (II) реакційних зон при продуванні киснем через близько розташовані донні сопла. $\phi = 1,2$ мм; $[C] = 3,8\%$; $Q = 20, 25, 30, 40$ та $50 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{хв}$ – а, б, в, г, д, е відповідно

І хоча загальний характер хвилеутворення при комбінованому продуванні близький до спостережуваного при донному, автори відзначали суттєве зменшення коливань конвертера GOR при комбінованій подачі дуття в порівнянні з суто донним продуванням киснем. Останнє пов'язано з тим, що

газовий висхідний потік, що формується, від донного продування руйнується газовими струменями, що витікають з сопел верхньої фурми, що перешкоджає хвилеутворенню на поверхні рідкої ванни. У цьому випадку, як відзначають багато дослідників, імпульси впливу на ванну верхнього і донного

дутьтя спрямовані в протилежні сторони, що пояснює дію верхнього дутьтя, що «гасить».

Виконано "гаряче" моделювання комбінованого продування. На першому етапі вивчали взаємодію реакційних зон при односопловій продувці зверху і знизу при віддаленому розташуванні донного і верхнього сопел (рис. 7), і співвісному розташуванні сопел. Взаємодія кисневих струменів з мета-

левою ванною при співвісному розташуванні сопел істотно відрізнялася від продування тільки зверху або тільки донного продування. Встановлено як індивідуальний розвиток верхньої та донної реакційних зон, так і утворення загальної реакційної зони при співвідношенні витрат дутьтя, що забезпечують їх зіткнення та взаємодію.



Рисунок 7. Вид реакційних зон, що утворюються при одночасному продуванні, металу знизу і зверху ($[C]=3,0\%$; $d_c = 1,0$ мм; $P_{O_2} = 2$ атм)

Відзначено, що газові обсяги, утворені донним вдуванням, через протидію зустрічних потоків верхнього дутьтя не можуть вільно без змін залишати металеву ванну. Останнє призводить до деякого збільшення діаметра зони загальної взаємодії зустрічних газометалевих потоків приблизно в 1,4-1,7 рази в залежності від співвідношення витрат кисню зверху і знизу. Ця зона є видозміненою, внаслідок взаємодії протилежно спрямованих потоків, загальну вторинну реакційну зону, що формується в результаті взаємодії реакційних зон верхнього і донного дутьтя. Газоподібні продукти рафінування металеві ванни, що утворюються у загальній зоні, виділяються переважно за межами реакційної зони верхнього кисневого потоку. При цьому спостерігається незначна інтенсифікація газовиділення в районі впровадження верхнього кисневого струменя у рідку ванну, а збільшення площі виходу з металеві ванни газоподібних продуктів призводить до більш розосередженого газовиділення з обсягу ванни, що знижує коливання та вібрацію. Щодо конвертерів ГКР перехід на чисто донну продувку азот (аргон)-кисневою сумішшю і продуванням аргон незалежно від ємності конвертерного агрегату конвертер GOR приводив до посилення вібрації [2, 5, 6].

Вібраційні характеристики на 1т GOR конвертері.

Авторами вивчено вібраційні характеристики на 1т GOR конвертері. Плавки проводили за типовою

технологією (рис. 8). Продування хромонікелевого розплаву вели через три донні фурми.

У перший період плавки здійснювали подачу кисню в оболонці природного газу, у другий метал продували сумішшю аргону та кисню, поступово замінюючи останній аргон. У ході дослідних плавок заміряли вібрацію конвертера. Для цього вібродатчик встановлювали на приводній цапфі агрегату газокисневого рафінування.

Зміна загального рівня вібрації конвертера газокисневого рафінування на одній із дослідних плавок наведено на рис. 8. Більш високий рівень вібросигналу та його падіння на початку процесу пов'язані із заливкою розплаву в конвертер, його поворотом та стабілізацією ванни. Надалі, у період продування металу киснем в оболонці природного газу, загальний рівень вібрації конвертера газокисневого рафінування характеризується відносно невисоким постійним рівнем. Перехід на продування сумішшю аргон – кисень у другому періоді плавки супроводжується помітним посиленням вібрації агрегату.

Амплітудно-частотний спектр вібропереміщень та віброшвидкості 1т GOR конвертера представлений на рис. 9. На частоті 1Гц рівень вібропереміщень при продуванні аргон-кисневою сумішшю максимальний і значно більший, ніж при подачі кисневого дутьтя в I-му періоді плавки (рис. 9L).

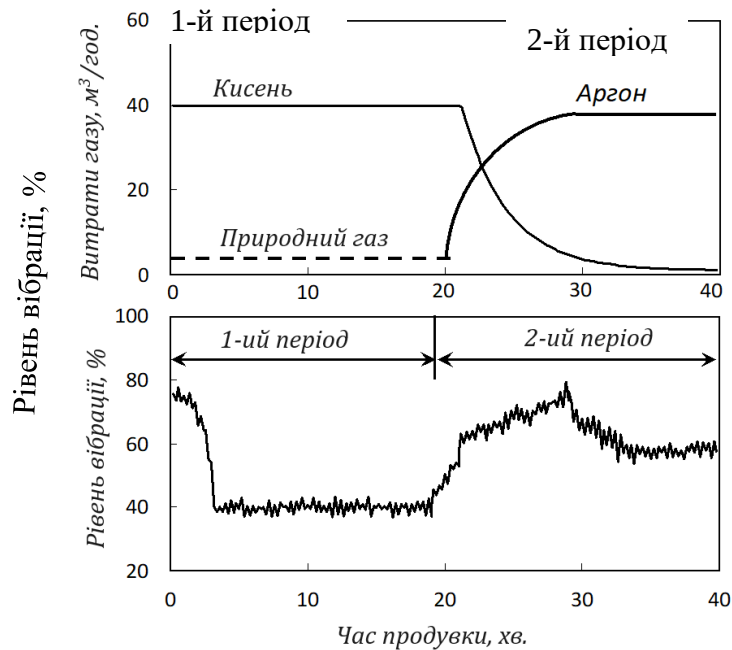


Рисунок 8. Зміна витрат газів та рівня вібрації під час продування

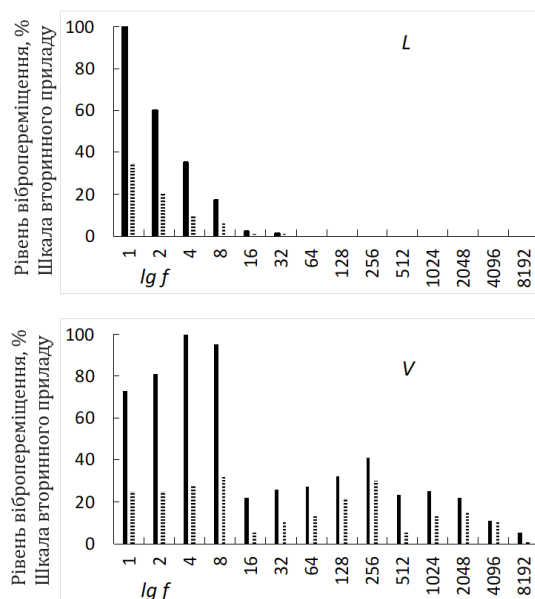


Рисунок 9. Амплітудно-частотний спектр вібропереміщень (L) та віброшвидкості (V): — у період продування сумішшю аргон-кисень; - - - у період продування киснем.

В амплітудно-частотному спектрі віброшвидкості також домінує низькочастотний спектр. У цьому частотному діапазоні віброшвидкість відображає два характерні коливальні процеси при продуванні аргон - кисневою сумішшю: коливання ванни (на частоті 1 Гц і менше) і пульсуюче виділення бульбашок з аргонем і монооксидом вуглецю в результаті впровадження аргон - кисневих струменів. Рівень віброшвидкості на частотах (1,2,4,8 Гц) в рази перевищує фіксований при кисневому продуванні.

Надалі з урахуванням виконаного спектрально-го аналізу особливу увагу приділили вивченню

зміни вібросигналів у процесі рафінування низько і середньочастотних діапазонах.

Зміна рівня віброшвидкості в першому періоді плавки добре повторює відому криву зміни швидкості зневуглецювання (рис.10а) в ході продувки кисневої конверторної ванни [2]. На початку процесу рівень безперервно підвищується, досягаючи максимальних значень до 16-ї хвилини продування. Потім зі зниженням вмісту вуглецю в металі рівень вібрації зменшується. Вміст вуглецю при мінімальному рівні вібросигналу у першому періоді плавки становив 0.185%.

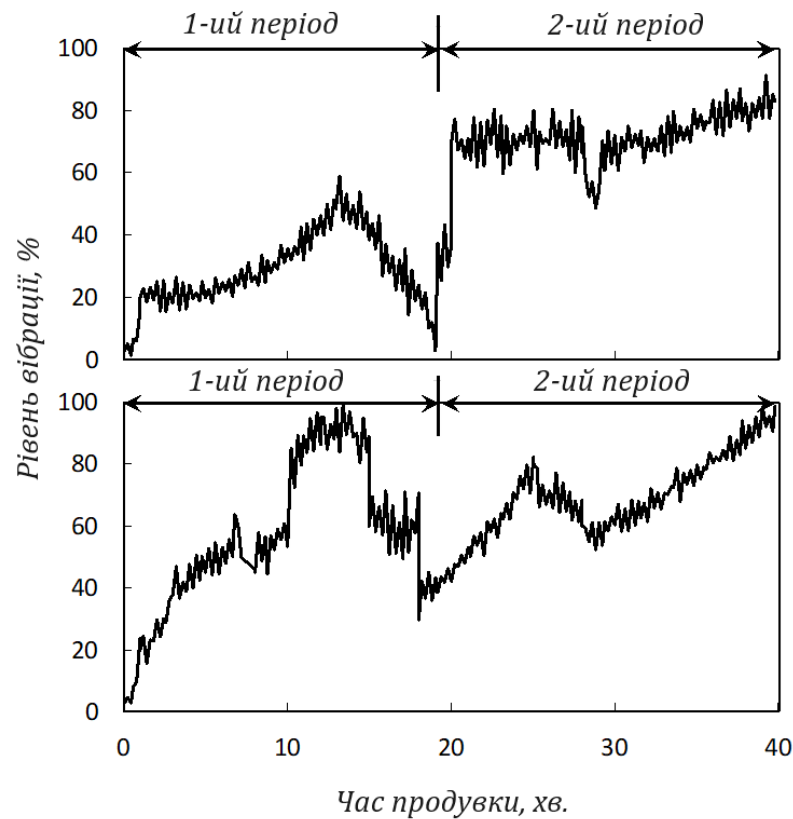


Рисунок 10. Зміна рівня вібрації під час продування в низькочастотному (а) та середньочастотному (в) діапазоні.

Рівень віброшвидкості у другому періоді плавки значно перевищує фіксований у першому і зберігається майже завжди високим, що відзначають і в роботах [5, 6].

Розглянуто зміну рівня вібросигналу в середньочастотній області (рис. 10в). Хоча спеціальних вимірів рівня шлако-металевої емульсії в конверторі газокисневого рафінування під час продування не проводили, візуальні спостереження за станом та висотою шлаку дозволяють зробити висновок про те, що вібрація агрегату в середньочастотному діапазоні пов'язана з процесами формування шлаку та зміною його рівня. Наявна в літературі інформація про частотний спектр сигналу при акустичному та вібраційному контролі рівня плавки в киснево-конверторному процесі підтверджує висловлену думку [2]. Високий рівень вібрації в кінці другого періоду плавки відповідав згортання шлаку, що спостерігається.

Для зменшення інтенсивності вібрації в періоди донного продування азот (аргон-кисневою) сумішшю на 1 т конвертері GOR у напівпромисловій лабораторії було реалізовано комбіноване продування зверху та знизу сумішшю аргон-кисень

(рис.11). Результати дослідів переконливо показали зниження віброактивності конвертера GOR при комбінованій продувці азот (аргон)-кисневою сумішшю в порівнянні з суто донним продуванням. При цьому була збільшена витрата газу, що подається, і скорочена тривалість плавки.

У процесі вивчення особливостей хвилеутворення при комбінованій продувці визначали оптимальні співвідношення витрат верхнього та донного дуття, положення верхньої фурми. Встановлено, що співвідношення питомих витрат дуття $\eta = Q_v / Q_d$ (тут Q_v і Q_d – витрати верхнього та донного дуття) і відносна висота верхньої фурми на рівнем спокійної ванни H_f мають основний вплив на хвилеутворення при комбінованому продуванні металу в кисневому конвертері та конвертері GOR, в яких забезпечується продування з утворенням хвиль мінімальної амплітуди на поверхні ванни.

На рис. 12 за даними В.І. Баптизмаського і А.М. Лонського [5] наведено залежності, що ілюструють вплив на утворення в конверторі стійких хвиль при відповідних значеннях η , H_f при різному розміщенні донних фурм.

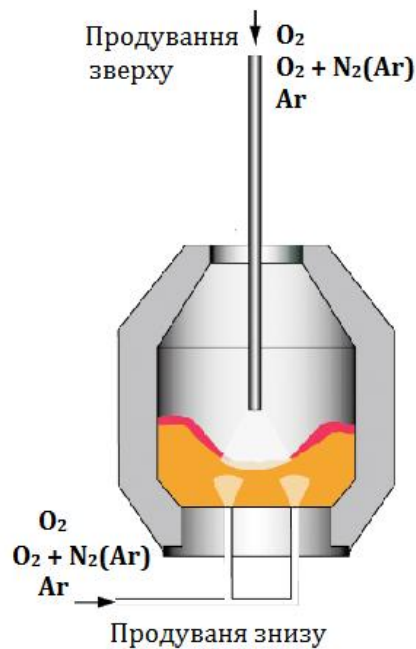


Рисунок 11. Організація комбінованої продувки зверху і знизу киснем, сумішшю N_2 (Ar) - O_2 і тільки Ar.

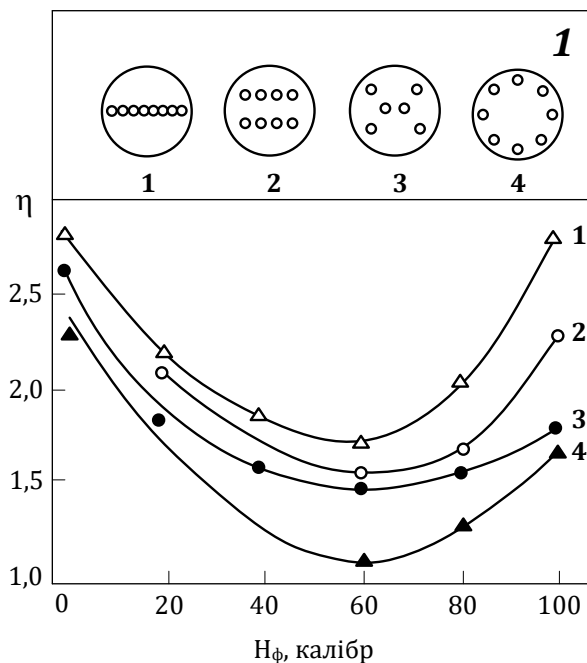


Рисунок 12. Способи розміщення фурм у днищі (1) та залежність хвилеутворення у ванні конвертера від співвідношення витрат верхнього та донного дуття та положення верхньої фурми

Області вище кривих характеризують параметри режиму продування, що протікає з утворенням хвиль мінімальної амплітуди. Режими продування, відповідні областям, розташованим нижче кривих, призводять до утворення стійких хвиль і збільшення амплітуди коливань корпусу конвертера більше допустимих значень.

Таким чином, коливання ванни та вібрація конвертера GOR були зменшені за рахунок раціональних чисел донних фурм та оптимального їх розміщення в днищі, застосування додатково верх-

ньої подачі дуття, включаючи продування через верхню фурму як кисню, так аргон-кисневою сумішшю.

ВИСНОВКИ

Аналіз результатів «холодного» і «гарячого» моделювання дозволив дійти висновку, що донне продування технологічними газами в конвертері GOR завжди супроводжується коливаннями ванни, поверхневими хвилями і вібрацією конвертерного агрегату.

На 1т GOR конвертері вивчені вібраційні характеристики. В амплітудно-частотному спектрі вібропереміщень та віброшвидкості домінують низько-частотні коливання конвертерного агрегату. Максимальні рівні вібропереміщень та віброшвидкості фіксували в період донного продування аргон-кисневою сумішшю.

На частотах 1-8 Гц вібрація конвертера пов'язана з пульсуючим характером газовиділення у вторинній реакційній зоні та коливаннями ванни.

Зниження віброактивності конвертера GOR у період продування киснем забезпечується раціональним розміщенням у днищі донних фурм та організацією додаткової подачі дуття через верхню фурму. Випробовано комбіноване продування зверху і знизу сумішами аргон-кисень. Остання дозволяло зменшити амплітуду вібрації конвертера GOR.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Velychko A.G. Gas-oxygen refining technologies-multifunctional opportunities for stainlers steel and ferroalloyalloys smelting. Proceeding of international Conference on High Quality Special steel 2022 – The 6 the Academic Conference on Special Metallurgy Technology. 18-21.8.2022. Shen Yang. China, P. 76-99.
2. Величко А.Г. Вибрация в конвертерной плавке. Днепропетровск: Системные технологии, 2000. 117с.
3. Чен Пей Дунь, Гао Женьмин, Жай Юйюу, Кристиан Брюкнер. Модернизация конвертеров для выплавки коррозионностойких сталей на заводе компании Taishan Iron & Steel Co, Китай. Металургическое производство и технологии процессов. МРТ. 2014. №2. С.22-31.
4. Shinji Kojima, Toshlynky Iwatam, Masahiro Yoshida. Vibration of a combined blowing conberter. Iron and Steel Engineer. April. 1987. P.25-31.
5. Отчет по научно-исследовательской работе "Разработка рациональной конструкции фурм для донной и комбинированной продувки с целью уменьшения вибрации конвертера", Днепропетровск, 1994. 79 с.
6. Jaefer Yenus, Cteoffrey Brooks, Michelle Dunn, Rohini Kadam. Application of vibration and Sound Signals in monitoring iron and steelmaking processes. Ironmaking & Steelmaking, August 2018, 47 (4), P.1-10 // <https://www.researchgate.net/>

REFERENS

1. Velychko A.G. Gas-oxygen refining technologies-multifunctional opportunities for stainlers steel and ferroalloyalloys smelting. Proceeding of international Conference on High Quality Special steel 2022 – The 6 the Academic Conference on Special Metallurgy Technology. 18-21.8.2022. Shen Yang. China, P. 76-99.
2. Velychko A.H. Vybratsyia v konverternoi pлавке. Dnepropetrovsk: Systemnye tekhnolohyy, 2000. 117s.
3. Chen Pei Dun, Hao Zhenmyn, Zhai Yuiou, Krystyan Briukner. Modernyzatsyia konverterov dlia vyplavky korrozyon-nostoikykh stalei na zavode kompanyy Taishan Iron & Steel Co, Kytai. Metalurhycheskoe proyzvodstvo y tekhnolohyy protsessov. MRT. 2014. №2. С.22-31.
4. Shinji Kojima, Toshlynky Iwatam, Masahiro Yoshida. Vibration of a combined blowing conberter. Iron and Steel Engineer. April. 1987. P.25-31.
5. Otchet po nauchno-yssledovatel'skoi rabote "Razrabotka ratsyonalnoi konstruktssyy furm dlia donnoi y kombynyrovannoi produvky s tseliu umenshenyia vybratsyy konvertera", Dnepropetrovsk, 1994. 79 s.
6. Jaefer Yenus, Cteoffrey Brooks, Michelle Dunn, Rohini Kadam. Application of vibration and Sound Signals in monitoring iron and steelmaking processes. Ironmaking & Steelmaking, August 2018, 47 (4), P.1-10 // <https://www.researchgate.net>

Надійшла до редколегії / Received by the editorial board: 01.03.2024

Прийнята до друку / Accepted for publication: 20.03.2024

Засельський В. Й., Пополов Д. В.

Лабораторні дослідження внутрішньошарових процесів в шихтових матеріалах при впливі вібраційно-ударної дії

Zaselskyi V., Popolov D.

Laboratory studies of intralayer processes in charge materials under vibrational-impact action

Дослідження спрямоване на визначення впливу вібраційно-ударних коливань сіячої поверхні на внутрішньошарові процеси шихтових матеріалів, що використовуються у металургійному виробництві. Експериментальну частину виконано на лабораторній моделі грохоту, яка дозволила моделювати внутрішньошарові процеси в умовах вібраційно-ударної дії. У ході дослідження оцінено інтенсивність сегрегації та дифузії за різних значень амплітуди та частоти коливань коробу. Для аналізу отриманих результатів застосовано методи математичного моделювання, що дало змогу побудувати функціональні залежності між динамічними параметрами грохоту та внутрішньошаровими процесами.

Отримані результати показали, що ефективність розділення сипких матеріалів на фракції значною мірою залежить від динамічних параметрів грохоту. Зокрема, встановлено, що амплітуда коливань має найбільший вплив на інтенсивність сегрегації та дифузії. Виявлено, що оптимальними параметрами роботи грохоту є прискорення 32 м/с^2 та амплітуда $0,002 \text{ м}$, які забезпечують максимальну ефективність процесу.

Наукова новизна дослідження полягає в розробці математичних моделей, що описують вплив амплітуди та частоти коливань на процеси сегрегації та дифузії в шарі шихтових матеріалів під впливом вібраційно-ударної дії. Ці моделі дозволяють визначити оптимальні режими роботи грохоту, спрямовані на підвищення ефективності підготовчих процесів у металургійному виробництві.

Практичне значення роботи полягає у вдосконаленні конструкції та режимів роботи грохотів, що сприяє зниженню собівартості та підвищенню якості підготовки шихтових матеріалів. Результати дослідження можуть бути використані при проектуванні нових і модернізації існуючих вібраційних машин для сортування металургійної сировини.

Ключові слова: вібраційно-ударна дія, грохочення, сегрегація, дифузія, шихтові матеріали, динамічні параметри, ефективність сортування, математичне моделювання.

The study aims to determine the effect of vibrational-impact oscillations of the screening surface on interlayer processes in charge materials used in metallurgical production. The experimental part was conducted on a laboratory model of a vibrating screen, which allowed simulating interlayer processes under vibrational-impact conditions. The study evaluated the intensity of segregation and diffusion under different amplitudes and frequencies of box oscillations. Mathematical modeling methods were applied to analyze the obtained results, enabling the construction of functional dependencies between the equipment's dynamic parameters and the interlayer processes.

The results demonstrated that the efficiency of separating bulk materials into fractions largely depends on the dynamic parameters of the vibrating screen. Specifically, it was established that the oscillation amplitude has the most significant influence on the intensity of segregation and diffusion. Optimal operating parameters for the vibrating screen were identified as an acceleration of 32 m/s^2 and an amplitude of 0.002 m , ensuring maximum process efficiency.

The scientific novelty of the study lies in the development of mathematical models that describe the influence of oscillation amplitude and frequency on segregation and diffusion processes in charge material layers under vibrational-impact conditions. These models enable the identification of optimal operating modes for vibrating screens to enhance the efficiency of preparatory processes in metallurgical production.

The practical significance of the study is the improvement of the design and operating modes of vibrating screens, contributing to cost reduction and higher quality preparation of charge materials. The findings can be applied in the design of new and modernization of existing vibrating machines for sorting metallurgical raw materials.

Keywords: vibrational-impact action, screening, segregation, diffusion, charge materials, dynamic parameters, sorting efficiency, mathematical modeling.

Вступ

Зниження собівартості продукції в гірничо-металургійній галузі є важливим завданням, вирішення якого значною мірою залежить від оптимізації підготовчих технологічних процесів, зокрема грохочення сировинних матеріалів. Сучасна практика демонструє широке застосування різноманітних типів грохотів, проте ефективність їхньої роботи у багатьох технологічних процесах залишається недостатньою.

Значна кількість досліджень присвячена аналізу впливу динамічних і режимних параметрів грохо-

тів з однорідними або неоднорідними коливаннями робочих органів. Разом із тим, питання, пов'язані з функціонуванням грохотів із вібраційно-ударною дією сіячої поверхні, на даний момент залишаються маловивченими.

Таким чином, детальне дослідження процесів розсіву металургійної сировини на споживчі класи із застосуванням сіячої поверхні вібраційно-ударної дії є перспективним напрямом, що дозволить визначити нові підходи до підвищення ефективності грохочення сипких матеріалів у гірничо-металургійній галузі.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Ефективність розсіву металургійної сировини на споживчі класи значною мірою визначається продуктивністю, яка забезпечує узгодженість всього технологічного ланцюга підготовчих процесів у гірничо-металургійному виробництві. Процес грохочення умовно поділяється на три взаємопов'язані етапи: транспортування матеріалу, забезпечення контакту дрібних фракцій із сіячою поверхнею та поглинання цих фракцій отворами сита. За даними [1-3], ефективність кожного з цих етапів залежить від динамічних і кінематичних параметрів обладнання, а також гранулометричного складу матеріалу.

Особливого значення набуває другий і третій етапи процесу, оскільки саме вони визначають ефективність сортування дрібних фракцій. На першому етапі транспортування матеріалу товстим шаром забезпечує необхідну продуктивність грохочення, а також створює умови для активізації процесів сегрегації та дифузії в шарі матеріалу. Ці процеси сприяють підвищенню швидкості доставки дрібних фракцій до сіячої поверхні, що є ключовим для досягнення високої ефективності розсіву.

Активізація другого етапу за рахунок сегрегаційних і дифузійних процесів є важливим напрямом досліджень, який дозволяє збільшити швидкість контакту дрібних частинок із сіячою поверхнею. Зокрема, цього досягають шляхом покращення розкриття порових каналів у шарі шихти завдяки

застосуванню коливань, дотичних або близьких до нормальних, до сіячої поверхні [4-7]. Такі дослідження переважно проводилися для грохотів, які генерують однорідні або неоднорідні коливання.

Натомість питання, пов'язані з функціонуванням грохотів із вібраційно-ударною дією сіячої поверхні, залишаються недостатньо вивченими. Зокрема, відсутні дослідження, які б описували внутрішньошарові процеси шихтових матеріалів під впливом вібраційно-ударної дії, що обмежує розуміння механізмів інтенсифікації грохочення металургійної сировини.

Тому дослідження такого роду є актуальними і своєчасними, які дозволять знайти шляхи інтенсифікації процесів грохочення шихтових матеріалів для металургійного виробництва.

Мета і завдання досліджень

Полягає в встановленні впливу вібраційно-ударних коливань сіячої поверхні на внутрішньошарові процеси в шихтових матеріалах, що використовуються в металургійному виробництві.

Матеріали та методи досліджень

Для якісної оцінки впливу режиму роботи грохоту з вільно укладеною сіячою поверхнею на інтенсивність внутрішньошарових процесів в шихтових матеріалах були проведені дві серії експериментів на лабораторній моделі, яка наведена на рис. 1.

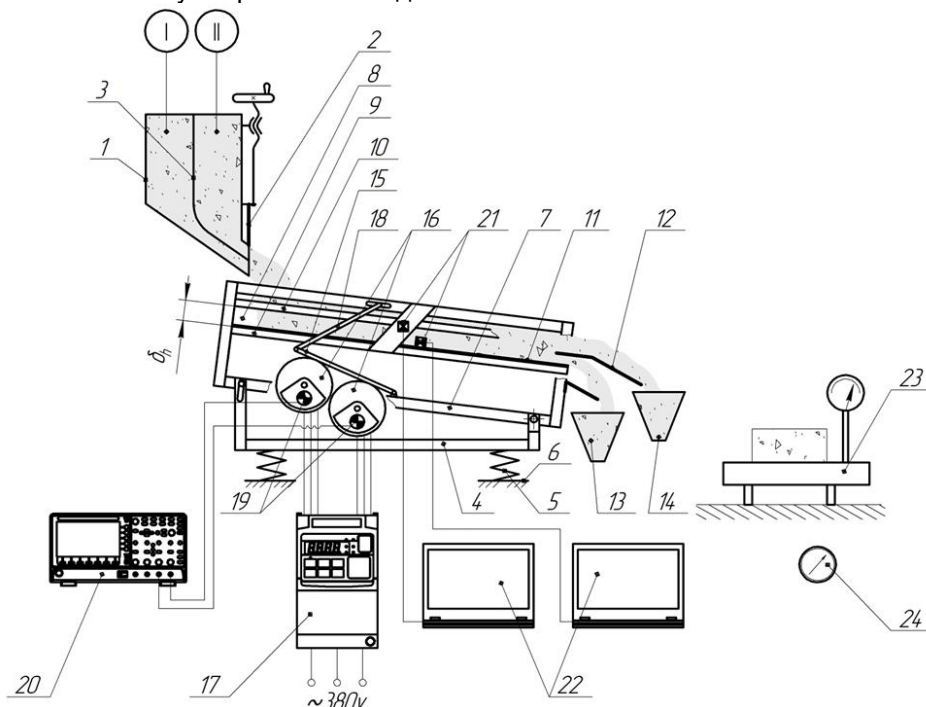


Рисунок 1– Структурна схема лабораторної установки:

1 - бункер; 2 - шиберний затвор; 3 - перегородка; 4 - лафет; 5 - пружинні опори; 6 - фундамент; 7 - рама; 8 - короб; 9 - нерухомий опорний кутник; 10 - рухомий опорний кутник; 11 - сіяча поверхня; 12 - ділильний ніж; 13, 14 - приймальний бункер; 15 - підвібраторна плита; 16 - мотор-вібратор; 17 - частотний перетворювач; 18 - тяга; 19 - фазовий датчик; 20 - осцилограф; 21 - датчик прискорення; 22 - лептоп; 23 - електронні ваги; 24 – секундомір

У всіх двох серіях досліди проводились в діапазоні прискорень коливань коробу $A \cdot \omega^2 = 9 \dots 74$ м/с², кожне значення прискорень отримували при трьох значеннях амплітуди його коливань ($A = 0,001$ м; $A = 0,002$ м; $A = 0,003$ м) та кутової частоти вимушених коливань коробу ($\omega = 94,2$ с⁻¹; $\omega = 125,6$ с⁻¹; $\omega = 157$ с⁻¹), що відповідає частотам обертання валу мотор-вібраторів (900 об/хв; 1200 об/хв; 1500 об/хв); при куті нахилу сіячої поверхні до горизонту $\alpha = 10^\circ$, куті вібрації до нормалі, проведеної до опорної поверхні підситника в подовжній площині $\beta = 45^\circ$.

Перша серія досліджень була спрямована на визначення інтенсивності сегрегації I_s , яка реалізовувалась наступним чином, за допомогою перегородки 3 (див. рис. 1) бункера 1 на вібруючу сі-

ячу поверхню 11, виконану у вигляді суцільного днища, лабораторного грохоту подавався вапняк, що складався з двох фракцій у пропорції 50/50: «дрібною» – $d_1 = 1,6 \dots 3$ мм та «крупною» – $d_2 = +4$ мм таким чином щоб нижній шар складався з «крупної» фракції, а верхній з «мілкої». Матеріал шаром висотою 60 мм переміщувався по сіячій поверхні до розвантажувальної частини, де розділявся на дві проби по висоті шару ділильним ножом 12, які накопичувались в приймальних бункерах 13 та 14. Обидві проби ретельно розсівались на класи d_1 та d_2 , мінімальна маса представницької проби $m_{пр}$ для ситового аналізу визначалась за формулою Локонова [8]

$$m_{пр} = 0,02 \cdot d_{\max}^2 + 0,5 \cdot d_{\max} \text{ кг}, \quad (1)$$

де $d_{\max}$ – розмір максимального шматка, мм.
Представницька проба становила 2,5 кг.

За результатами розсіву обчислювалась інтенсивність сегрегації I_s , яка дорівнює приросту середнього діаметру часток в пробі матеріалу за одиницю часу впливу на неї вібраційно-ударної дії

$$I_s = \frac{d_{2\text{cep}} - d_{\text{cep}}^H}{t} + \frac{d_{\text{cep}}^B - d_{1\text{cep}}}{t} \text{ мм/с}, \quad (2)$$

де $d_{1\text{cep}}$, $d_{2\text{cep}}$ – середній діаметр «дрібною» та «крупною» фракції відповідно, який визначався

$$d_{1\text{cep}} = \frac{d_{1\max} + d_{1\min}}{2} \text{ мм}; \quad (3)$$

$$d_{2\text{cep}} = \frac{d_{2\max} + d_{2\min}}{2} \text{ мм}, \quad (4)$$

де $d_{1\max}$, $d_{2\max}$ – максимальний розмір частинки «дрібною» та «крупною» фракції відповідно, мм;
 $d_{1\min}$, $d_{2\min}$ – мінімальний розмір частинки «дрі-

бною» та «крупною» фракції відповідно, мм; d_{cep}^B , d_{cep}^H – середній діаметр частинок у верхній та нижній пробах відповідно

$$d_{\text{cep}}^B = \frac{d_{1\text{cep}} \cdot q_1^B + d_{2\text{cep}} \cdot q_2^B}{q_1^B + q_2^B} \text{ мм}; \quad (5)$$

$$d_{\text{cep}}^H = \frac{d_{1\text{cep}} \cdot q_1^H + d_{2\text{cep}} \cdot q_2^H}{q_1^H + q_2^H} \text{ мм}, \quad (6)$$

де q_1^B , q_2^B – масова частка «дрібною» та «крупною» фракції у верхній пробі, %; q_1^H , q_2^H – масова частка «дрібною» та «крупною» фракції у нижній пробі, %;
 t – час впливу на матеріал вібраційно-ударної дії, с.

Показник I_s характеризує інтенсивність направленої, зобов'язаного сегрегації, руху «дрібною» фракції, яка знаходиться в шарі вапняку, перебуваючого під впливом вібраційно-ударної дії, на контакт з вільно укладеною сіячою поверхнею 11.

Друга серія досліджень реалізовувалась за вищеописаною методикою, відрізняючись тим, що нижній шар вапняку, який подавався з бункера 1 на сіячу поверхню 11, складався з «дрібною» фракції, а верхній з «крупною». Після такої ж, як і в першій серії досліджень розділці проб і розсівання їх на початкові фракції обчислювалась інтенсивність дифузії I_d , котра також дорівнює приросту середнього діаметру часток в пробі матеріалу за одиницю часу впливу на неї вібраційно-ударної дії

$$I_d = \frac{d_{\text{cep}}^H - d_{1\text{cep}}}{t} + \frac{d_{2\text{cep}} - d_{\text{cep}}^B}{t} \text{ мм/с}. \quad (7)$$

Показник I_d характеризує інтенсивність процесу перемішування — випадкового, стохастичного, зобов'язаного дифузії руху частинок «дрібної» та «крупної» фракцій в шарі вапняку, що перебуває на сіячій поверхні під впливом вібраційно-ударної дії.

Величина I_s та I_d визначалась для кожної пари значень динамічних параметрів коробу — A та ω . Запропонований в роботах [9, 10] метод аналізу результатів експериментів шляхом побудови графіків залежності I_s та I_d від величини прискорень коливання коробу $A \cdot \omega^2$ є неприйнятним для вібраційно-ударних процесів, оскільки аргумент функції не має визначеності значення, тобто, одна і та сама величина прискорення може бути отримана при різних амплітудах та кутових частотах вимушених коливань коробу, процес у да-

ному випадку розглядатиметься як адитивний без аналізу впливу вібраційного переміщення та інтенсивності ударної дії на процес сегрегації та дифузії.

Зважаючи на викладене вище, аналіз результатів експериментів проводився шляхом побудови графіків функціональної залежності інтенсивності сегрегації та дифузії від амплітуди — $I_s = f(A)$; $I_d = f(A)$ та кутової частоти вимушених коливань коробу — $I_s = f(\omega)$; $I_d = f(\omega)$.

Результати досліджень

На рис. 2, а та рис. 2, б наведені отримані залежності інтенсивності сегрегації та дифузії від амплітуди та кутової частоти вимушених коливань коробу, відповідно.

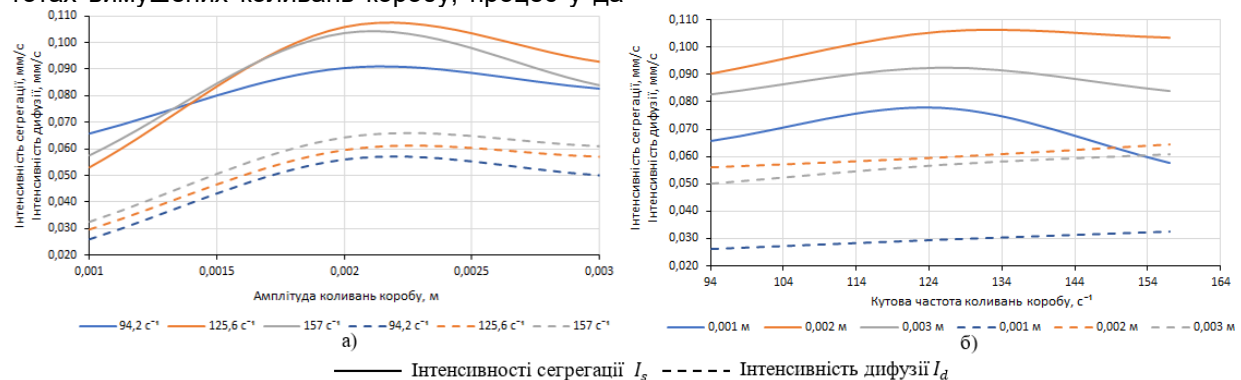


Рисунок 2 – Залежність інтенсивності внутрішньосарових процесів від амплітуди (а) та кутової частоти (б) коливань коробу

З рис. 2 видно, що інтенсивність сегрегації в діапазоні досліджуваних амплітуд та кутових частот коливань коробу значно залежить від його динамічних параметрів, в свою чергу, інтенсивність дифузії виявилась слабко залежною від кутової частоти. Характер функціональних залежностей є екстремальним, до того ж області максимуму розташовуються в тих самих діапазонах значень амплітуд та кутових частот, окрім $I_d = f(\omega)$, котрий наближений до прямо пропорційного. З графіків залежностей $I_s = f(A)$, $I_d = f(A)$, $I_s = f(\omega)$ випливає, що ефект розділення та перемішування частинок в шарі матеріалу зі збільшенням амплітуди коливань та кутових частот спочатку зростає, досягаючи максимуму при $A = 0,002$ м та $\omega = 125,6$ с⁻¹, а при їх більших значеннях починає зменшуватись.

З функціональних залежностей випливає, що ефект розділення сипкого матеріалу за крупністю та ефект перемішування в шарі матеріалу, який знаходиться під вібраційно-ударною дією, є результатом одночасного протікання процесів сегрегації та дифузії. Однак вочевидь, що на всьому діапазоні амплітуд та кутової частоти вимушених коливань коробу доставка дрібних фракцій на контакт з сіячою поверхнею відбувається переважно сегрегацією.

Порівняльний аналіз інтенсивності сегрегації та дифузії при звичайній вібраційній та вібраційно-ударній діях на сипкий матеріал показав, що на відміну від вібраційної дії при вібраційно-ударній доставка дрібних фракцій на контакт з сіячою поверхнею визначається інтенсивністю процесу сегрегації на всьому діапазоні визначених прискорень, в діапазоні прискорень коливань коробу використовуваних грохотів (26...32 м/с²) інтенсивність процесу сегрегації та дифузії має максимальне значення, які більше на 38 % та в 3 рази відповідно.

Для вивчення взаємовпливу динамічних параметрів коробу на інтенсивність протікання внутрішньосарових процесів при вібраційно-ударній дії був проведений повних факторний експеримент, в якому реалізовано ортогональну план-матрицю другого порядку, де x_1 — амплітуда вимушених коливань коробу, а x_2 — їх кутова частота. Математичний опис залежності інтенсивності сегрегації та дифузії від обраних факторів здійснювався за допомогою квадратичного рівняння регресії виду

$$y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} b_i \cdot x_i + \sum_{1 \leq i \leq j \leq k} b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{1 \leq i \leq k} b_{ii} \cdot (x_i^2 - \varphi), \quad (8)$$

де b_0 , b_i , b_{ij} , b_{ii} – коефіцієнти регресії, які завдяки забезпеченню ортогональності плану, визначаються незалежно друг від друга за формулою [11]

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^n x_{iu} \cdot y_u}{\sum_{u=1}^n x_{iu}^2}. \quad (9)$$

З урахуванням встановлених коефіцієнтів були отримані рівняння регресії в кодових значеннях

$$I_s = 0,102 + 0,014 \cdot x_1 + 1,167 \cdot 10^{-3} \cdot x_2 + 2,25 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,027 \cdot x_1^2 - 3,167 \cdot 10^{-3} \cdot x_2^2; \quad (10)$$

$$I_d = 0,06 + 0,013 \cdot x_1 + 4,333 \cdot 10^{-3} \cdot x_2 + 10 \cdot 10^{-4} \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,017 \cdot x_1^2 - 6,667 \cdot 10^{-4} \cdot x_2^2. \quad (11)$$

Перевірку адекватності отриманих рівнянь виконувалась використовуючи критерій Фішера [12]. Оскільки умова була виконана, то отримані рівняння регресії (10), (11) адекватні експерименту, тоді їх можна представити в натурних значеннях

$$I_s = -0,0713 + 113 \cdot A + 7 \cdot 10^{-4} \cdot \omega + 0,072 \cdot A \cdot \omega - 27000 \cdot A^2 - 3,212 \cdot 10^{-6} \cdot \omega^2 \text{ мм/с}; \quad (12)$$

$$I_d = 0,053 + 77 \cdot A + 2,44 \cdot 10^{-4} \cdot \omega + 0,032 \cdot A \cdot \omega - 17000 \cdot A^2 - 6,76 \cdot 10^{-7} \cdot \omega^2 \text{ мм/с}. \quad (13)$$

Виведені в наслідок перетворення рівняння регресії (12), (13) є математичними моделями, які відображають вплив динамічних параметрів короби — амплітуди (в діапазоні від 0,001 до 0,003 м) та кутової частоти (в діапазоні від 94,2 до 157 с⁻¹) його вимушених коливань, на внутрішньошарові процеси, які характеризуються інтенсивністю сегрегації та дифузії, в шихтових матеріалах під вібраційно-ударною дією, при 20 % рівні значущості.

Одержані математичні моделі були піддані графічному аналізу (рис. 3), який дозволив наочно

встановити міру впливу кожного фактору на параметр оптимізації.

З отриманих графіків поверхонь видно, що найбільший вплив на внутрішньошарові процеси, які протікають під вібраційно-ударною дією, має амплітуда коливань короби.

Для інтенсивної доставки дрібних фракцій на контакт з вільно укладеною сіячою поверхнею вібраційного грохоту, короб котрого здійснює направлені гармонійно стійкі коливання слід забезпечити режим коливань з прискоренням 32 м/с² при амплітуді 0,002 м.

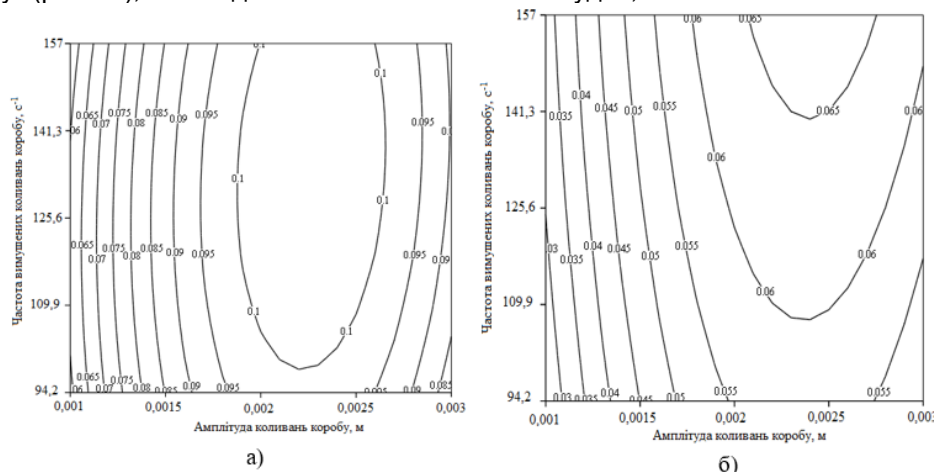


Рисунок 3 – Залежність інтенсивності сегрегації (а) та дифузії (б) від амплітуди та кутової частоти коливань короби

Висновки

Проведені лабораторні дослідження дозволили одержати наступні результати:

розроблена діюча лабораторна модель вібраційного грохоту, яка дозволяє змоделювати внутрі-

шньошарові процеси в шихтових матеріалах при впливі вібраційно-ударної дії; отримано функціональні залежності інтенсивності сегрегації та дифузії в шарі сипкого матеріалу, який знаходиться під вібраційно-ударною дією, від амплітуди та кутової частоти коливань короби, які дозволили встановити, що ефект розділення сипкого матеріалу за крупністю та перемішування в шарі матеріалу є результатом одночасного протікання процесів сегрегації та дифузії, причому доставка дрібних фракцій на контакт з сіячою поверхнею відбувається переважно за рахунок сегрегації на всьому діапазоні амплітуд та кутової частоти вимушених коливань короби;

одержано математичні моделі, які відображають вплив амплітуди та кутової частоти вимушених коливань короби, на інтенсивність сегрегації та дифузії в шарі сипкого матеріалу під впливом вібраційно-ударною дією, при 20 % рівні значущості, які дозволили встановити що найбільший вплив на внутрішньошарові процеси має амплітуда коливань короби, а для інтенсивної доставки дрібних фракцій на контакт з вільно укладеною сіячою поверхнею слід забезпечити режим коливань з прискоренням 32 м/с^2 при амплітуді 0,002 м.

Бібліографічний опис

1. Учитель С. А., Лялюк В. П., Пополов Д. В. Сортировка металлургических шихт на вибрационных грохотах. Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2014. 413 с.
2. Теория и технология подготовки шихтовых материалов для доменной и бездомной металлургии железа: учебник / Журавлев Ф. М. та ін., Кривой Рог: Чернявский Д. А., 2020. 663 с.
3. Удосконалення обладнання та процесів вуглепідготовки і коксосування металургійного виробництва: монографія / В. Й. Засельський, Д. В. Пополов та ін. Кривий Ріг: Літерія, 2019. 203 с.
4. Сортировка минерального сырья и шихт на вибрационных грохотах: монография / А. Д. Учитель и др. Днепропетровск: Пороги, 1998. 194 с.
5. Учитель А. Д., Засельский В. И., Григорьева В. Г. Перспективное оборудование для подготовки агломератов и спеков к плавке. *Проблемы механики горно-металлургического комплекса*: Материалы междунар. науч.-технич. конф., г. Днепропетровск. 2002. С. 198–199
6. Засельский В. И. Инерционные грохоты с неоднородными колебаниями: монография. Днепропетровск: Пороги, 2007. 144 с.
7. Засельский В. И. Разработка научных основ конструирования вибрационных машин для высокоэффективной сортировки металлургической шихты: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Днепропетровск, 2008. 330 с.
8. Краснов Д. А. Теоретические основы и расчетные формулы определения веса проб. Недра, 1969. 124 с.
9. Учитель А. Д. Создание высокоэффективных вибрационных машин для подготовки металлургических шихт: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Днепропетровск, 1992. 511 с.
10. Зелов Е. А. Разработка и внедрение высокопроизводительных шихтовых грохотов с неоднородным полем траекторий: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Кривой Рог, 1986. 208 с.
11. Винарский М. С., Лурье М. В. Планирование эксперимента в технических исследованиях. Киев: Техніка, 1975. 168 с.
12. Ахназарова С. Л., Кафаров В. В. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии: Учебное пособие для химико-технологичес. вузов. Высшая шк., 1978. 319 с.

References

1. Uchitel' S. A., Lyalyuk V. P., Popolov D. V. Sortirovka metallurgicheskikh shikht na vibratsionnykh grokhotakh. Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2014. 413 s.
2. Teoriya i tekhnologiya podgotovki shikhtovykh materialov dlya domennoy i bezdomennoy metallurgii zheleza: uchebnik / Zhuravlev F. M. ta in., Krivoy Rog: Chernyavskiy D. A., 2020. 663 s.
3. Udoskonallennia obladnannia ta protsesiv vuhlepidohtovky i koksosortuvannia metalurhiinoho vyrobnytstva: monohrafiia / V. Y. Zaselskyi, D. V. Popolov ta in. Kryvyi Rih: Literiia, 2019. 203 s.
4. Sortirovka mineral'nogo syr'ya i shikht na vibratsionnykh grokhotakh: monografiya / A. D. Uchitel' i dr. Dnepropetrovsk: Porogi, 1998. 194 s.
5. Uchitel' A. D., Zasel'skiy V. I., Grigor'eva V. G. Perspektivnoe oborudovanie dlya podgotovki aglomeratov i spekov k plavke. *Problemy mekhaniki gorno-metallurgicheskogo kompleksa*: Materialy mezhdunar. nauch.-tekhnich. konf., g. Dnepropetrovsk. 2002. S. 198–199.
6. Zasel'skiy V. I. Inertsionnye grokhoty s neodnorodnymi kolebaniya-mi: monografiya. Dnepropetrovsk: Porogi, 2007. 144 s.
7. Zasel'skiy V. I. Razrabotka nauchnykh osnov konstruirovaniya vibratsionnykh mashin dlya vysokoeffektivnoy sortirovki metallurgicheskoy shikhty: Dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk. Dnepropetrovsk, 2008. 330 s.
8. Krasnov D. A. Teoreticheskie osnovy i raschetnye formuly opredele-niya vesa prob. Nedra, 1969. 124 s.
9. Uchitel' A. D. Sozdanie vysokoeffektivnykh vibratsionnykh mashin dlya podgotovki metallurgicheskikh shikht: Dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk. Dnepropetrovsk, 1992. 511 s.
10. Zelov E. A. Razrabotka i vnedrenie vysokoproizvoditel'nykh shikhto-vykh grokhotov s neodnorodnym polem traektoriy: Dissertatsiya na sois-kanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. Krivoy Rog, 1986. 208 s.
11. Vinarskiy M. S., Lur'e M. V. Planirovanie eksperimenta v tekhnicheskikh issledovaniyakh. Kiev: Tekhnika, 1975. 168 s.
12. Akhnazarova C. L., Kafarov V. V. Optimizatsiya eksperimenta v khimii i khimicheskoy tekhnologii: Uchebnoe posobie dlya khimiko-tekhnologichesk. vuzov. Vysshaya shk., 1978. 319 s.

Надійшла до редколегії / Received by the editorial board: 01.03.2024

Прийнята до друку / Accepted for publication: 20.03.2024

ЗМІСТ

САВКІН С.В., БАЛАКІН В.Ф.	
Визначення залишкових напружень при виробництві зваряних труб за магнітною пам'яттю.....	5
ЗАСЕЛЬСЬКИЙ В.Й., СУСЛО Н.В., ГУК Є.С., ЗАСЕЛЬСЬКИЙ І.В., ПАНЧЕНКО Г. М., ЗЄЛОВА К.Є.	
Дослідження впливу ливарного виробництва на забруднення навколишнього середовища в місті Кривий Ріг.....	10
МАЛІЧ М.Г., КРЕСС Д.В., АВРАМЕНКО С.О.	
Оцінка енергетичної ефективності щокочових дробарок з простим і складним рухом щокоч.....	18
БАЛАКІН В.Ф., КАДИЛЬНИКОВА Т.М., САВКІН С.В., БАЛАХАНОВА Т.Ю.	
Вплив вібрації на мікроструктуру шва зварних труб	24
СРЕБРЯНСЬКИЙ Г.О., КРИВЧИК Л.С., ХОХЛОВА Т.С., ГОЛОВАЧОВ А.М., ПІДГОРНИЙ С.М.	
Зміцнення трубопресового інструменту для виробництва корозійностійких труб нанесенням покриття аморфних сплавів.....	32
ДОБРОВ І.В., СЬОМІЧЕВ А.В., ПАВЛЕНКО О.М.	
Розрахунково-аналітичний метод визначення силових параметрів кривошипно-повзунного механізму (повідомлення 2. Кінетостатика)	41
НАЗЮТА Л.Ю., СТЕПАНЕНКО Д.В.	
Декарбонізація енергетики Китаю. Копалини теплоносії.	47
КОНОВОДОВ Д.В., БОЯРКІН В.В., МАСЛОВ Д.А.	
Автоматизований розрахунок параметрів процесу холодної прокатки штаб на безперервних станах.....	55
ВЕЛИЧКО О.Г., ВОЛКОВА О.І., ДЖОХУА ЧЖАН	
Коливальні явища та вібрація конвертера газокисневого рафінування.....	60
ЗАСЕЛЬСЬКИЙ В. Й., ПОПОЛОВ Д. В.	
Лабораторні дослідження внутрішньощарових процесів в шихтових матеріалах при впливі вібраційно-ударної дії	70
ЗМІСТ	76
CONTENT	77

CONTENT

SAVKYN S.V., BALAKIN V.F.

DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSES IN THE PRODUCTION OF WELDED PIPES BY MAGNETIC MEMORY 5

ZASELSKIY V., SUSLO N., HUK Y., ZASELSKIY I., PANCHENKO H., ZIELOVA K.

RESEARCH ON THE IMPACT OF FOUNDRY PRODUCTION ON POLLUTION OF THE ENVIRONMENT IN THE CITY OF KRYVYI RIH 10

MALICH M.G., KRESS D.V., AVRAMENKO S.O.

EVALUATION OF ENERGY EFFICIENCY OF JAW CRUSHERS WITH SIMPLE AND COMPOUND JAW MOVEMENT 18

BALAKIN V.F., KADYLNKOVA T.M., SAVKIN S.V., BALAKHANOVA T.YU.

THE INFLUENCE OF VIBRATION ON THE MICROSTRUCTURE OF THE SEAM OF WELDED PIPES 24

SREBRYANSKY G, KRIVCHIK L, KHOKHLOVA T, HOLOVACHOV A, PIDHORNYY S

STRENGTHENING OF PIPE PRESSING TOOLS FOR PRODUCTION OF CORROSION-RESISTANT PIPES BY APPLICATION OF AMORPHOUS ALLOYS ... 32

DOBROV I.V., SEMICHEV A.V., PAVLENKO O.M.

CALCULATION AND ANALYTICAL METHOD FOR DETERMINING THE FORCE PARAMETERS OF A CRANK-SLIDER MECHANISM
(MESSAGE 2. KINETOSTATICS) 41

NAYUTA L., STEPANENKO D.

DECARBONIZATION OF CHINA'S ENERGY SECTOR. FOSSIL FUELS AS HEAT CARRIERS. 47

KONOVODOV D.V., BOIARKIN V.V., MASLOV D.A.

AUTOMATED CALCULATION OF COLD ROLLING PARAMETERS ON CONTINUOUS ROLLING MILLS 55

VELYCHKO O.G., VOLKOVA E.I., JIANG ZHOUHUA

OSCILLATORY PHENOMENA AND VIBRATION OF THE CONVERTER FOR GAS-OXYGEN REFINING 60

ZASELSKIY V., POPOLOV D.

LABORATORY STUDIES OF INTRALAYER PROCESSES IN CHARGE MATERIALS UNDER VIBRATIONAL-IMPACT ACTION 70

ЗМІСТ 76

CONTENT 77

ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА МЕТАЛУРГІЇ

Загальнодержавний науково-технічний журнал

Засновники: Український державний університет науки і технологій

Відділення матеріалознавства і металургії

Академії інженерних наук України

Головний редактор, голова редакційної ради проф. Проїдак Ю.С.

Зам. головного редактора д.т.н., проф. Камкіна Л.В.

Адреса редакції: 49600, м. Дніпро, вул. Лазаряна, 2.

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

Підписано до друку 23.01.2023 року.

Тираж 100 примірників.

Ціна вільна

© Теорія і практика металургії, 2023

THEORY AND PRACTICE OF METALLURGY

National scientific and technical journal

Founders: Ukrainian State University of Science and Technologies

Department of Materials Science and Metallurgy

of the Academy of Engineering Sciences of Ukraine

Editor-in-Chief, Chairman of the Editorial Board prof. Proydak Yu.

Honorable Editor of the Ph.D., prof. Kamkina L.

Editorial office: 49600, Dnipro, Lazarana, 2.

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

Signed for printing 23/01/2023.

Circulation of 100 copies.

Price is free

© Theory and Practice of Metallurgy, 2023