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

ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА МЕТАЛУРГІЇ

№5
(136)
2022

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
2022

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

Загальнодержавний науково-технічний журнал

ISSN 1028-2335

Випуск 5 (136) 2022р

Свідоцтво про реєсстрацію: 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 60х84$^{1}/_{8}$.
Ум.друк.арк. 5,12
Адреса редакції та видавця: Національна металургійна академія України, пр.Гагаріна, 4, м.Дніпро, 49006
т.(056) 745-41-96;
Тираж 100 прим.

Засновники:
Центр (відділення) матеріалознавства і металургії Академії інженерних наук України
Національна металургійна академія України

Редакційна колегія

Головний редактор
д.т.н., проф. **Пройдак Ю.С.** (Україна)
Заступник головного редактора
д.т.н., проф. **Камкіна Л.В.** (Україна)

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

Передрук лише за дозволом редакції
При використанні матеріалів посилання на журнал обов'язкове
Видавництво не несе відповідальність за зміст матеріалу, наданого автором до друку
Матеріали публікуються на мові оригіналу
За якість перекладу статей на англійську мову редакція відповідальності не несе
Редакційна рада залишає за собою право змінювати текст статей, не впливаючи на загальний зміст наданого матеріалу

+38056-745-41-96;
http://tpm.nmetau.edu.ua
e-mail:projdak@metal.nmetau.edu.ua

Комп'ютерне верстання О.Г.Безшкуренко

©НМетАУ 2022

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

THEORY AND PRACTICE OF METALLURGY

#5
(136)
2022

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
2022

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 5 (136) 2022 year

Certificate of registration:
КВ № 21962-11862ПР
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 60x84$^{1}/_{8}$.
CPP. 5,12
Editorial address and publisher: National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarina, 4, Dnipro 49006
т.(056) 745-41-96;
Copies of 100.

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

Editorial board

Editor in Chief
D.Tech.Sc., prof. **Proydak Yu** (Ukraine)
Honorable Editor
D.Tech.Sc., prof. **Kamkina L.** (Ukraine)

Prof., d.t.s. Bilodidenko S.	(Ukraine)
Prof., d.t.s. Volkova O.	(Gemany)
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

©NMetAU 2022

УДК 669.017:621.73

Пінчук В.Л., Самсоненко А.А., Бобух О.С., Кузьміна О.М., Корнєв С.В., Фролов Я.В.

Дослідження впливу параметрів процесу гарячого пресування корозійностійких труб на зношування матричних кілець за допомогою комп'ютерного моделювання

Pinchuk V., Samsonenko A., Bobukh O., Kuzmina O., Korniev S., Frolov Ya.

Investigation of the influence of the hot extrusion parameters of corrosion-resistant pipes on the matrix rings wear by computer simulation

***Мета**. При експлуатації інструменту, зокрема у технологічному процесі пресування корозійностійких труб, одним з основних видів руйнування є зношування. Встановлено, що 85 ... 90% інструменту, що використовується в процесах обробки тиском, виходить з ладу в результаті зносу і тільки 10 - 15% з інших причин. Зношування – процес руйнування і відділення матеріалу з поверхні інструменту та/або накопичення його залишкової деформації при терті, який проявляється у поступовій зміні розмірів й форми інструменту. Наразі процес зношування та зносостійкість інструменту часто вивчається за допомогою комп'ютерного моделювання. Часто комп'ютерне моделювання використовується також як перший етап перед випробуванням досліджуваного процесу в лабораторних та виробничих умовах.*

***Методика.** Дана робота присвячена моделюванню процесу пресування труб за допомогою ПП QForm UK 10 і дослідженню впливу параметрів технологічного процесу на розподіл тиску та температур на контакті заготовки та матриці для оцінки зносу матриці.*

***Результати**. Теоретично досліджено вплив коефіцієнту витяжки, початкової температури заготовки та швидкості руху прес-штемпеля на зношування матричного кільця та силу пресування під час процесу пресування труб розмірами 60×14 мм та 60×8 мм зі сталі 08Х18Н10Т. Дослідження проведено за методикою повнофакторного експерименту 2^3.*

***Наукова новизна.** Отримано регресійні залежності максимальних значень параметрів зношування матриці та сили пресування від вищезазначених факторів. Досліджено розподіл температури, тиску та зношування на робочій поверхні матриці.*

***Практична значущість.** Визначено, що основну долю (≥ 90 %) значення сумарного зношування матриці складає зношування від тиску. Також визначено, що ділянки розподілу максимальних значень зношування та максимальних значень тиску не співпадають. Додатковий аналіз результатів моделювання дозволяє висунути гіпотезу про спільний вплив інтенсивності деформації (або ступеню деформації) та відносної швидкості заготовки на контакті з інструментом на зношування. Дана гіпотеза потребує подальшої теоретичної та експериментальної перевірки.*

Ключові слова**: **пресування, матричне кільце, корозійно-стійкі труби, комп'ютерне моделювання, зношування, параметри деформації

During the operation of the tool, in particular, in the technological process of corrosion-resistant pipes extrusion, one of the main types of destruction is wear. It has been established that 85 ... 90% of the tool used in metal forming processes fails as a result of wear and tear and only 10 - 15% for other reasons. Wear is the process of destruction and separation of material from the surface of the tool and/or accumulation of its residual deformation due to friction, which manifests itself in a gradual change in the size and shape of the tool. Currently, the wear process and tool wear resistance are often studied using computer simulations. Often, computer simulation is also used as the first stage before testing the researched process in laboratory and production conditions. This work is devoted to the modeling of the pipe extrusion process using QForm UK 10 program and to the study of the influence of technological process parameters on the distribution of pressure and temperatures at the contact of the billet and the matrix to assess the wear of the matrix. The influence of the extraction coefficient, the initial temperature of the billet, and the velocity of the press stamp on the wear of the die ring and the extrusion force at the production of 60x14 mm and 60x8 mm pipes made of 08X18N10T steel was theoretically investigated. The research was carried out according to the method of the full-factor experiment 23. The regression dependences of the maximum values of the matrix wear parameters and the extrusion force on the above-mentioned factors were obtained.

The distribution of temperature, pressure and wear on the working surface of the matrix is scientifically justified. It was determined that the main share (≥ 90%) of the value of the total wear of the matrix is wear from pressure. It is also determined that the areas of distribution of maximum values of wear and maximum values of pressure do not coincide. An additional analysis of the simulation results allows to put forward a hypothesis about the joint influence of the intensity of deformation (or the strain) and the relative velocity of the billet in contact with the tool on wear. This hypothesis needs further theoretical and experimental verification.

Key words: extrusion, matrix ring, corrosion-resistant pipes, computer modeling, wear, deformation parameters

Корозійностійкі труби знаходять широке застосування в авіаційній промисловості, ракетобудівництві, атомній енергетиці, суднобудівництві та інших відповідальних галузях. Їх виготовляють здебільшого методом пресування (екструзії) на трубопрофільних пресах і методом холодної про-

Пінчук В.Л.,	
Самсоненко А.А.,	
Бобух О.С.,.	
Кузьміна О.М.,	
Корнєв С.В.,	
Фролов Я.В	

катки. При пресуванні метал піддається всебічному нерівномірному стисненню, що значно підвищує пластичність металу і дозволяє досягати дуже високих ступенів деформації.

Пресування найбільш доцільно при виробництві труб з високолегованих, малопластичних сталей і сплавів, біметалічних виробів, зі складною конфігурацією перерізу. Приведені позитивні особливості процесу пресування, а також можливість виготовлення труб, порожнистих і суцільних профілів складної форми широкого сортаменту з порівняно високою продуктивністю, можливість виробництва невеликих партій продукції зумовили доцільність розширення виробництва на трубопрофільних пресах. В процесі виробництва використовують велику кількість трубного інструменту, вартість якого становить до 25% від вартості переробки всього трубопресового цеху. Від якості пресового інструменту напряму залежить якість труб при пресуванні. Тому він в першу чергу повинен мати точні розміри і високий клас чистоти поверхні. Крім того, він повинен бути зносостійким, мати достатню твердість в поєднанні з пружністю і в'язкістю.

Умови роботи трубопресового 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. Тиск на гравюру матриць досягає 1000 МПа. Основні причини руйнування матриць і матричних кілець трубних пресів - це втрата форми і розмірів каналу, крихке руйнування і розгарні тріщини.

Пресовий інструмент можна підрозділити на дві групи. До першої групи відноситься інструмент, що має безпосередній контакт з пресованим металом (матриці, прес-шайби, внутрішні втулки контейнерів, прошивні голки, трубні оправки і матрицетримачі). До другої групи відноситься інструмент, що не має безпосереднього контакту з пресованим металом і служить для передачі зусилля (прес-штемпель, голкотримачі, перехідні патрони, контейнери, проміжні втулки контейнерів, напрямні кільця) [1].

Матриці і матричні кільця складних матриць мають велику кількість різновидів конструкції. Вони працюють у важких температурних умовах, піддаються високому питомому тиску. Розміри і форма робочої поверхні впливають на стійкість матриць [2]. Конструкція матриці для пресування труб містить вхідну ділянку, робоча поверхня якого виконана сполученими опукло-увігнутими поверхнями, калібруючу і вихідну ділянки.

Динамічне навантаження матриць викликає появу тріщин в місці концентрації напружень і температурних градієнтів, а також подальше крихке руйнування. В результаті дії температурних і деформаційних напружень на робочих поверхнях матриць з'являються сітки розгарних тріщин, які поступово розширюються і заповнюються пресованим металом, що в подальшому призводить до руйнування матриць [3] (Рис.1).

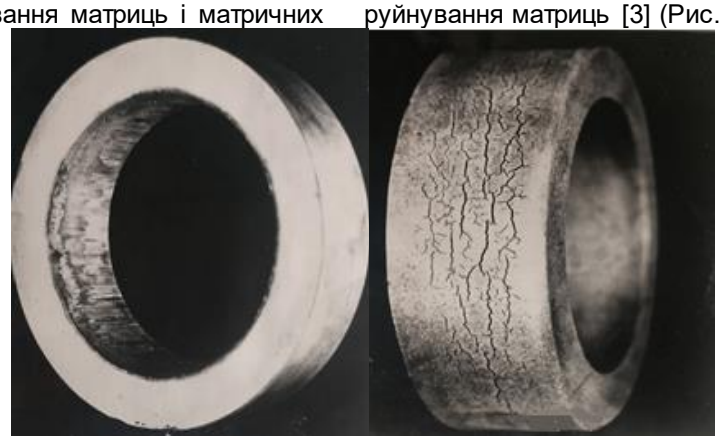


Рисунок 1 - Дефекти матричних кілець

Існує багато шляхів підвищення стійкості трубопресового інструменту. Хіміко-термічна обробка (ХТО) є одним з найбільш ефективних методів підвищення довговічності і надійності інструменту. Це в першу чергу визначається тим, що при ХТО змінюється хімічний склад, структура і властивості поверхневих шарів металу, саме тих, в яких при експлуатації концентруються максимальні напруження, зароджуються і розвиваються тріщини, відбуваються процеси зношування і корозійного розтріскування [4]. За допомогою хіміко-термічної обробки можна підвищити поверхневу твердість, зносостійкість, втомлювальну міцність, корозійну стійкість, окалиностійкість деформуючого інструменту. Найчастіше використовуються наступні процеси ХТО – цементація, нітроцементація, азотування, борування, ціанування, оксидування і дифузійне хромування [5-7].

В роботі [8] наведено перспективний спосіб зміцнення інструменту за рахунок насичення його поверхні бором. В результаті на поверхні інструменту утворюються бориди, які мають високі зносостійкі і корозійностійкі характеристики, а також жаростійкість і жароміцність. Також в роботі показана ефективність використання з метою зміцнення інструменту електрофізичних способів зміцнення – електроіскрового легування, локального електроіскрового нанесення покрить, електроакустичного нанесення покрить на інструмент.

Найпоширенішим способом зміцнення поверхні матричних кілець є азотування, в результаті проведення якого сталь отримує високу твердість на

поверхні, яка не змінюється при нагріванні до 400…450°С, високі значення опору зношуванню, межі витривалості, корозійної стійкості [9-12]. Іонне азотування (в порівнянні з пічним) має наступні переваги: прискорює дифузійні процеси в 1,5 … 2 рази; дозволяє отримати дифузійний шар регульованого складу і будови; характеризується незначними деформаціями виробів і високим класом чистоти поверхні; дає можливість азотувати корозійностійкі жароміцні і мартенситно-старіючі сталі без додаткової депасивуючої обробки; значно скорочує загальний час процесу за рахунок зменшення часу нагрівання та охолодження садки; має велику економічність, підвищує коефіцієнт використання електроенергії, скорочує витрату газів; нетоксичне; відповідає вимогам щодо захисту навколишнього середовища. Комбінована обробка матричних кілець, що включає азотування з наступним осадженням керамічних покрить TiN, TiZrN, TiN-NbN в єдиному технологічному процесі, проводиться з використанням двоступінчастого вакуумно-дугового розряду в вакуумно-дугових установках типу «Булат» (ННЦ ХФТІ) В роботах [11, 12] описано технологію нанесення покрить для різних видів інструменту з використанням вакуумно-дугового розряду низького тиску і обґрунтовано доцільність використання зносостійких покрить для підвищення експлуатаційних характеристик інструменту.

В роботах [13-17] розглянуто спосіб підвищення зносостійкості трубопресового інструменту газоплазмовим нанесенням нанопокрить з сучасних аморфних сплавів.

Газополуменевим напиленням на металеві або неметалеві поверхні можна наносити покриття з порошків будь-якого складу. При цьому найбільш ефективними є покриття на основі порошків зі сплавів, які самофлюсуються, на основі нікелю або заліза Ni-Cr-Si-B-C, Ni-Cr-Si-B і Fe-Cr-Si-B.

У вищезазначених сплавах хімічні елементи B і Si, а також P і C є аморфізаторами і при загартуванні розплаву забезпечують самофлюсування матеріалу при взаємодії з інструментом.

Завдання дослідження зносостійкості інструменту полягає у встановленні залежності зносу від факторів, що характеризують якість поверхні інструменту, вид мастила та ін. Ці залежності дозволяють оптимізувати технологію виготовлення, умови експлуатації кілець, покращити і прогнозувати їхню роботоспроможність [18-20].

При пресуванні корозійностійких труб на трубопрофільному пресі силою 44,1 МН стійкість матричних кілець зі сталі 5Х3В3МФС складає всього 5-7 циклів пресування. Для вивчення впливу параметрів процесу пресування на зношування матричних кілець цього пресу було виконано математичне моделювання процесу, з використанням методом скінченних елементів. Для цього використовували програмне забезпечення для моделювання процесів пластичної деформації QForm UK 10.

Програмне забезпечення QForm UK використовується для розробки та оптимізації процесів обробки металів тиском і є світовим лідером в моделюванні процесів обробки металів тиском. Програмний комплекс дозволяє моделювати технологічні процеси пластичної деформації з урахуванням факторів нагріву та охолодження металу, в тому числі в процесі деформації, а також при взаємодії заготовки, що деформується, з технологічним інструментом та обладнанням. В основу математичної постановки покладена система рівнянь, які включають рівняння рівноваги, рівняння зв'язку між полем швидкостей матеріальних точок та швидкостей деформації, рівняння зв'язку між напруженим та деформованим станом, умови нестиснення, критерій пластичності, рівняння енергетичного балансу [21-23].

Загальну схему процесу прямого пресування труб наведено на рис.2. Оскільки даний процес є вісесиметричним, то моделювання було виконано у відповідній постановці.

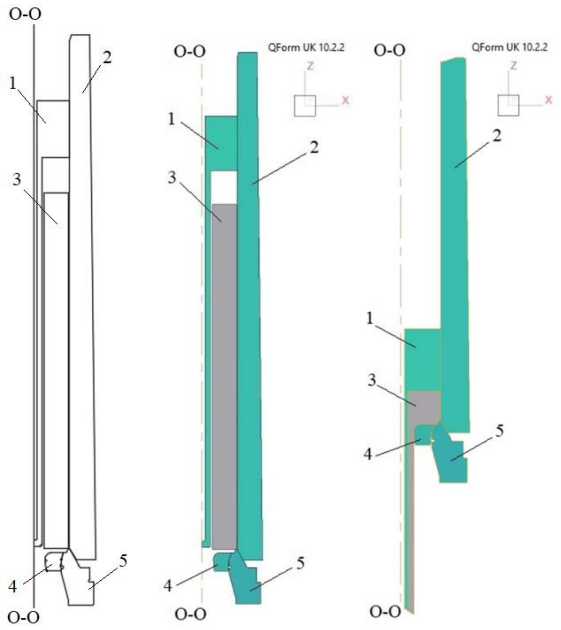
Креслення пласких замкнутих контурів інструменту та заготовки виконано в AutoCAD LT 2023 в форматі *.dxf та завантажено в проєкт (рис. 2).

Основними параметрами заготовки, що враховані в моделі, є розміри заготовки, матеріал, температура нагріву заготовки в печі та час транспортування від печі до пресу.

В якості обладнання для деформації було обрано гідравлічний прес, з індивідуальним приводом, з максимальною силою пресування 44,1 МН та номінальною швидкістю руху прес-штемпеля 229 мм/с. Швидкісно-силову діаграму пресу наведено на рис 3.

При розрахунку зношування матриці емпіричні коефіцієнти в формулах для визначення зношування від тиску та від дотичних напружень були прийняті рівними 1 [24]. Це пов'язано з відсутністю інформації про дані коефіцієнти в літературі та складністю їх експериментального визначення. Вищенаведене припущення дозволяє оцінити зношування інструменту на якісному рівні.

Основними параметрами моделювання були наступні: розміри заготовки (l×d×s) – 950×187×66 мм; розміри труби (d_1×s_1) – 60×14 мм та 60×8 мм, температура навколишнього середовища – 20 °С; фактор тертя на контакті заготовки з інструментом m=0,15 [25]; матеріал заготовки – сталь 08Х18Н10Т (таблиця 1).



О-О – вісь симетрії, 1 – прес-штемпель з оправкою, 2 – контейнер; 3 – заготовка, 4 – матриця, 5 – матричне кільце

Рисунок 2 - Креслення контурів (а), загальний вигляд (б) та вигляд після розрахунку (в) моделі прямого пресування труб (вісесиметрична задача)

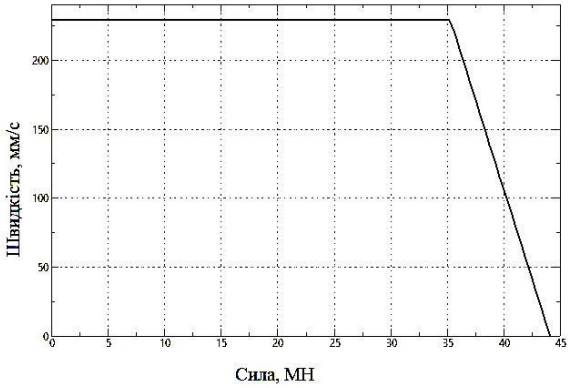


Рисунок 3 - Діаграма потужності горизонтального преса 44,1 МН

Таблиця 1 Хімічний склад сталі 08Х18Н10Т, % по масі (ГОСТ 25054-81)

C	Si	Mn	Cr	Ti	Ni	Cu	S	P
					Не більше			
0,07	0,7	1	17	0,45	11	0,30	0,025	0,025
0,08	0,8	2	19	0,5				

Реологічні властивості сталі 08Х18Н10Т інтерпретовані у вигляді графіків (рис.4). На вісі абсцис відкладено істинну умовну деформацію, на вісі ординат - опір деформації в МПа.

Варіювалися наступні параметри процесу: коефіцієнт витяжки λ, початкова температура заготовки Т та швидкість руху прес-штемпеля V.

Дослідження проводились за планом повнофакторного експерименту 2^3 (таблиця 2).

За результатами моделювання було отримано поля розподілу тиску та температур на контакті інструменту та заготовки, поля зношування інструменту, а також графіки зміни сили пресування під час перебігу процесу (рис.5).

Для дослідження комплексного впливу вищезазначених параметрів процесу в якості цільових функцій оберемо наступні:

T_{max} – максимальна температура на контакті заготовки та матриці;

p_{max} – максимальний тиск на контакті заготовки та матриці;

Wp_{max} – максимальне значення зношування матриці від тиску;

Wt_{max} – максимальне значення зношування матриці від дотичних напружень;

P_{max} – максимальна сила пресування під час стабільного перебігу процесу.

В таблиці 3 наведено матрицю планування зі значеннями факторів та визначені за результатами моделювання значення цільових функцій.

Рівняння регресії для повнофакторного експерименту 2^3 в загальному вигляді [26]:

$$Y = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + b_{23} \cdot X_2 \cdot X_3 + b_{13} \cdot X_1 \cdot X_3 + b_{123} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 , \quad (1)$$

де Y – цільова функція;

$b_0, b_1, \ldots b_{123}$ – відповідні коефіцієнти регресії.

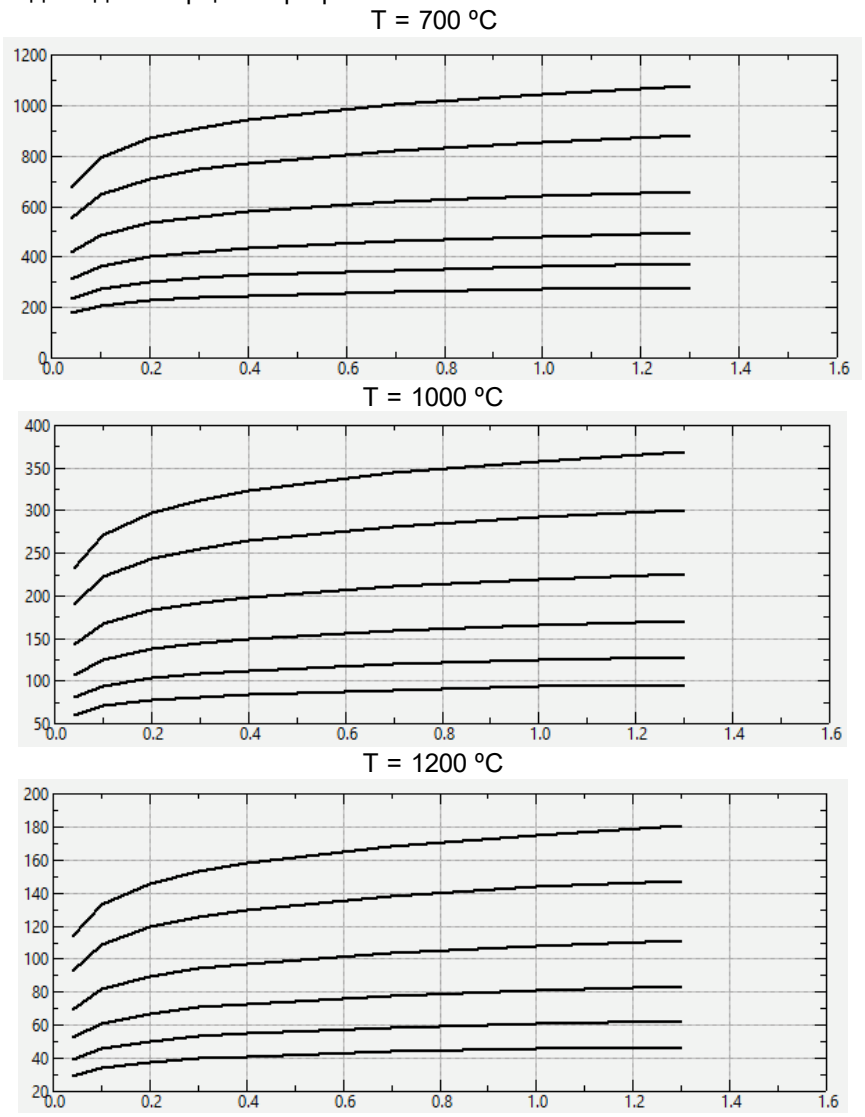


Рисунок 4 – Залежність опору деформації сталі 08Х18Н10Т від температури, ступеню та швидкості деформації (0.01, 0.1, 1, 10, 100 та 500 $с^{-1}$). На вісі абсцис відкладено істину умовну деформацію, на осі ординат опір деформації в МПа

Таблиця 2 Матриця планування

Фактори	X_1	X_2	X_3
	λ	T, °C	V, мм/с
Нульовий рівень	14,645	1150	275
Інтервал варіювання	2,805	50	46
Верхній рівень (+)	17,45	1200	321
Нижній рівень (-)	11,84	1100	229
Номер досліду			
1	+	+	+
2	+	+	-
3	+	-	+
4	+	-	-
5	-	+	+
6	-	+	-
7	-	-	+
8	-	-	-

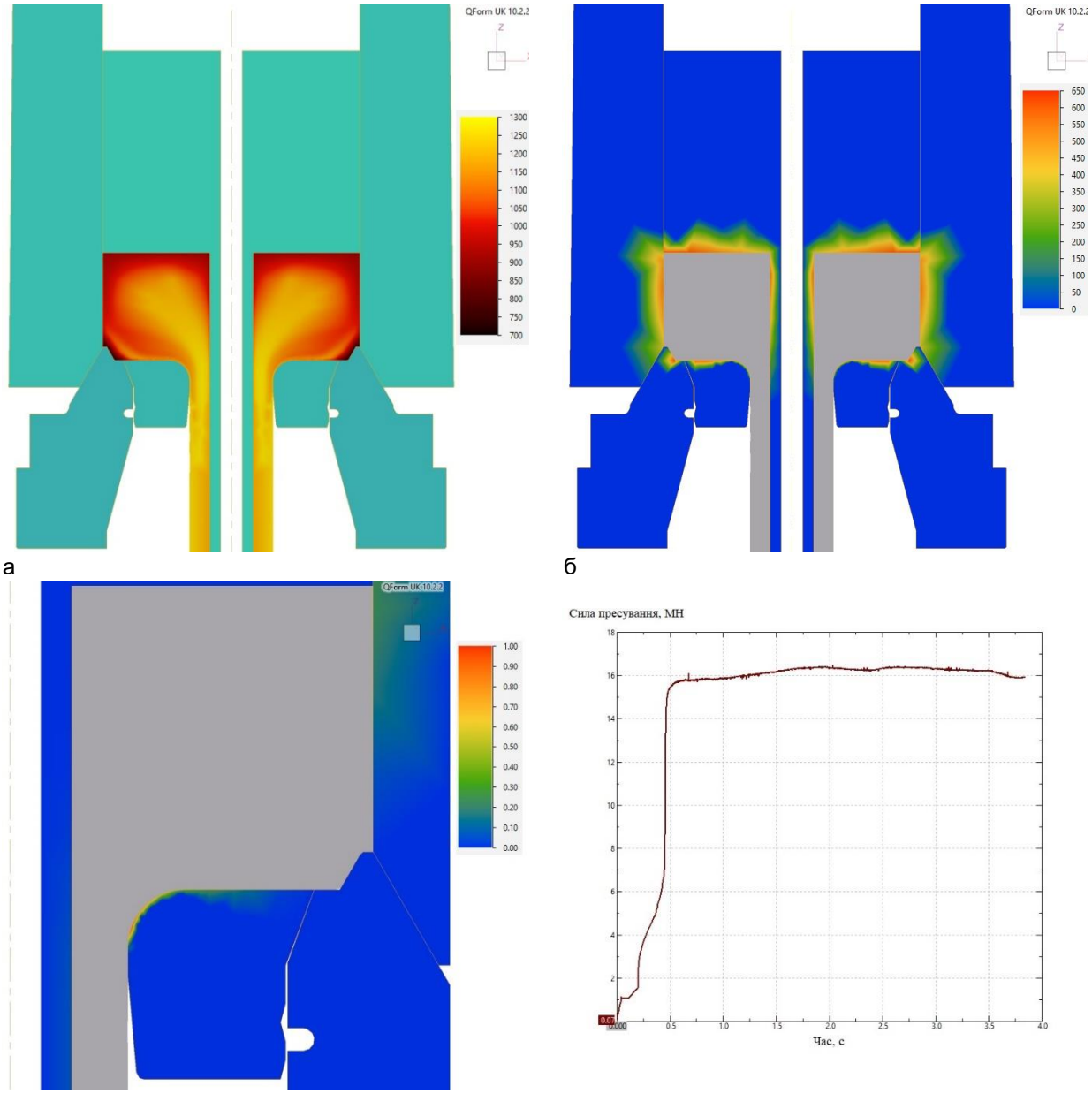


Рисунок 5 – Приклади результатів розрахунків: а – розподіл температур в заготовці, °С; б – розподіл тиску на поверхні інструменту, МПа; в – розподіл зношування від тиску, МПа; г – зміна сили пресування в залежності від часу, МН.

Таблиця 3 - Матриця планування та результати дослідів

№ досл.	Фактори			Цільові функції				
	λ	Т, °С	V, мм/с	T_{max}, °С	p_{max}, МПа	Wp_{max}, од. довж.	Wt_{max}, од. довж.	P_{max}, МН
1	17,45	1200	321	1354	717	1,7	0,11	18,7
2	17,45	1200	229	1309	721	1,64	0,1	19
3	17,45	1100	321	1329	883	1,8	0,11	23
4	17,45	1100	229	1290	882	1,794	0,111	23,5
5	11,84	1200	321	1283	598	0,966	0,066	16,3
6	11,84	1200	229	1263	602	0,96	0,07	16,4
7	11,84	1100	321	1236	784	1,09	0,073	20,8
8	11,84	1100	229	1216	792	1,096	0,073	20,5

В таблиці 4 наведено розраховані коефіцієнти регресії для кожної з вищевказаних цільових функцій.

Таблиця 4 - Результати розрахунку коефіцієнти регресії

Y	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{23}	b_{13}	b_{123}
T_{max}	1285	35,5	17,25	15,5	-6,25	0,75	5,5	0,75
p_{max}	747,4	53,4	-87,9	-1,9	6,1	-0,1	1,1	-1,1
Wp_{max}	1,38	0,35	-0,06	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01
Wt_{max}	0,089	0,019	-0,003	0,001	0,000	0,001	0,002	0,002
$W_{\Sigma max}$	1,470	0,371	-0,067	0,009	0,001	0,009	0,010	0,007
P_{max}	19,8	1,3	-2,2	-0,1	0,0	0,0	-0,1	0,1

Розглянуто розподіл температури, тиску та зношування на робочій поверхні матриці. Оскільки конструкція матриці передбачає заокруглення на робочій поверхні матриці, то в якості системи координат було обрано полярну з центром в точці початку радіусу заокруглення (рис. 6).

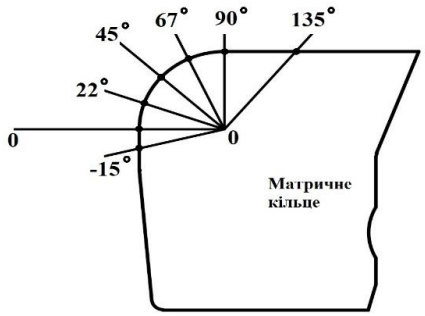


Рисунок 6 - Схема до визначення системи полярних координат

Аналіз вищенаведених таблиць та графіків дозволяє зробити висновки про наступне. На максимальну температуру на контакті заготовки та матриці всі розглянуті фактори мають приблизно однаковий вплив; комплексний вплив факторів на температуру - на один або декілька порядків менше. Максимальний тиск на контакті заготовки та матриці суттєво залежить від коефіцієнту витяжки та початкової температури; швидкість перебігу процесу та комплексна дія факторів не має суттєвого впливу на максимальне значення тиску. Аналогічну ситуацію спостерігаємо для зношування матриці від тиску та сумарного зношування матриці. Зношування матриці від дотичних напружень суттєво залежить лише від зміни коефіцієнту витяжки. Максимальна сила пресування під час стабільного перебігу процесу в основному залежить від коефіцієнту витяжки та початкової температури.

З урахуванням ступеню впливу розглянутих факторів та враховуючи кодування факторів, остаточно отримуємо наступні рівняння для розрахунку цільових функцій:

- максимальна температура на контакті заготовки та матриці:

$$T_{max} = 1285 + 35{,}5 \cdot \frac{\lambda - 14{,}645}{2{,}805} + 17{,}25 \cdot \frac{T - 1150}{50} + 15{,}5 \cdot \frac{V - 275}{46},\ °C \quad (2)$$

- максимальний тиск на контакті заготовки та матриці:

$$p_{max} = 747{,}4 + 53{,}4 \cdot \frac{\lambda - 14{,}645}{2{,}805} - 87{,}9 \cdot \frac{T - 1150}{50},\ МПа \quad (3)$$

– максимальне значення зношування матриці від тиску:

$$Wp_{max} = 1{,}38 + 0{,}35 \cdot \frac{\lambda - 14{,}645}{2{,}805} - 0{,}06 \cdot \frac{T - 1150}{50},\ од.\ довж. \quad (4)$$

– максимальне значення зношування матриці від дотичних напружень:

$$Wt_{max} = 0{,}089 + 0{,}019 \cdot \frac{\lambda - 14{,}645}{2{,}805},\ од.\ довж. \quad (5)$$

– максимальне значення сумарного зношування матриці:

$$W_{\Sigma max} = 1{,}47 + 0{,}371 \cdot \frac{\lambda - 14{,}645}{2{,}805} - 0{,}067 \cdot \frac{T - 1150}{50},\ од.\ довж. \quad (6)$$

– максимальна сила пресування під час стабільного перебігу процесу:

$$P_{max} = 19{,}8 + 1{,}3 \cdot \frac{\lambda - 14{,}645}{2{,}805} - 2{,}2 \cdot \frac{T - 1150}{50},\ МН \quad (7)$$

Аналіз кривих розподілу температури (рис. 7) показує для всіх випадків присутність максимальних значень температури 1200…1300 °С на поверхні інструменту в зоні робочого пояска матриці. Далі в напрямку області контакту інструменту з зоною ускладненої деформації температура знижується до 1000…1150 °С. Підвищена температура на дільниці 15-22° пов'язана з наявністю додаткового розігріву металу внаслідок його інтенсивної пластичної деформації в цій зоні.

Найбільші значення тиску (500…700 МПа) на контакті заготовки та матриці (рис. 8) мають місце на дільниці 90-135° та пов'язані із значним гідростатичним тиском в зоні ускладненої деформації.

Зношування на матриці (рис. 9, 10) має найбільші значення на ділянці 0 ÷ 45°, тобто не на ділянці дії максимального тиску (рис. 8). Додатковий аналіз результатів моделювання показує наявність максимальних значень швидкості деформації на контакті заготовки з цією частиною матриці (рис. 11). Це дозволяє висунути гіпотезу про спільний вплив інтенсивності деформації (або ступеню деформації) та відносної швидкості заготовки на контакті з інструментом на зношування (рис.9, б).

Порівняння рис. 9 та рис. 10 показує невелику частку зношування від дотичних напружень (≤ 10 %) в сумарному зношуванні матриці. Основну долю сумарного зношування складає зношування від тиску.

Також за результатами дослідження було розглянуто вплив визначених параметрів процесу на силу пресування. На рис. 12 представлено зміну сили пресування від часу у вигляді точкових діаграм.

Порівняння рис. 12, а, та 12, б, показує майже повну відсутність в розглянутому інтервалі впливу швидкості руху прес-штемпеля на силу пресування. Також наведені графіки підтверджують отриманий раніше більш вагомий, ніж вплив коефіцієнту витяжки, вплив початкової температури заготовки на силу пресування протягом всього перебігу процесу.

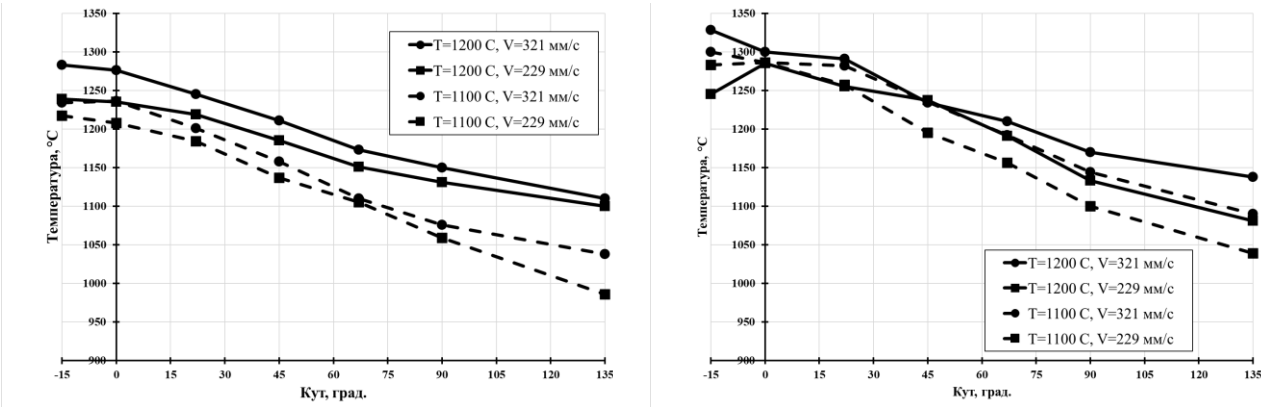


Рисунок 7 - Розподіл температури на робочій поверхні матриці: а) λ=11,84; б) λ=17,45

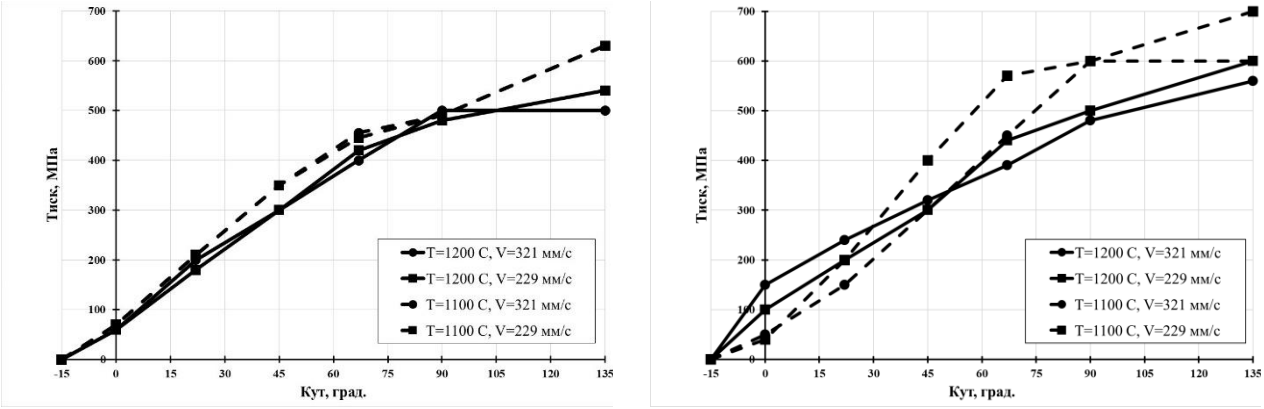


Рисунок 8 - Розподіл тиску на робочій поверхні матриці : а) λ=11,84; б) λ=17,45

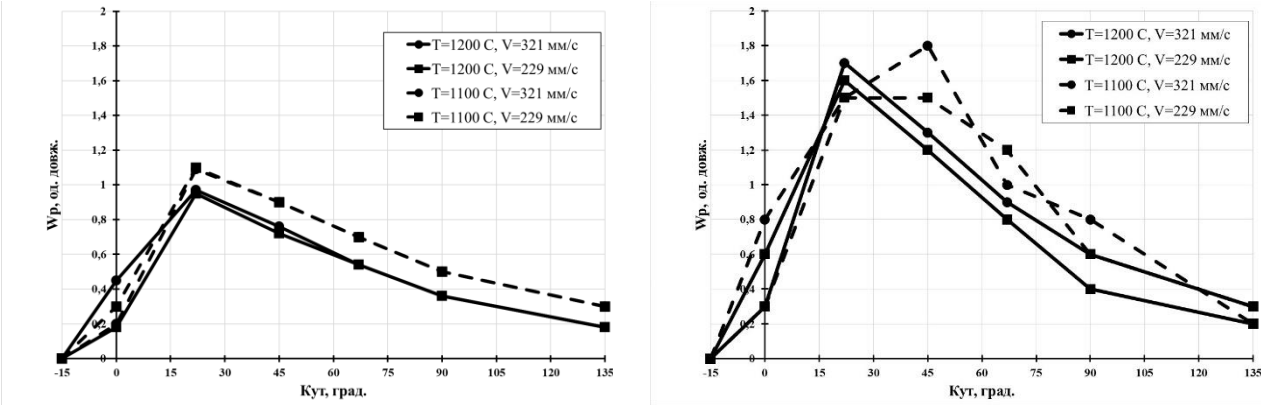


Рисунок 9 - Розподіл зношування від тиску на робочій поверхні матриці : а) λ=11,84; б) λ=17,45

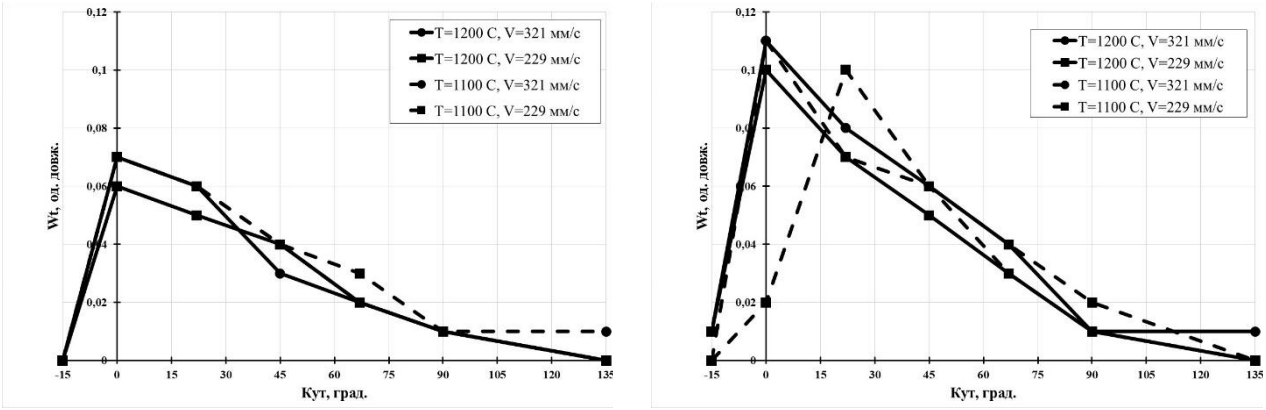


Рисунок 10 - Розподіл зношування від дотичних напружень на робочій поверхні матриці : а) λ=11,84; б) λ=17,45

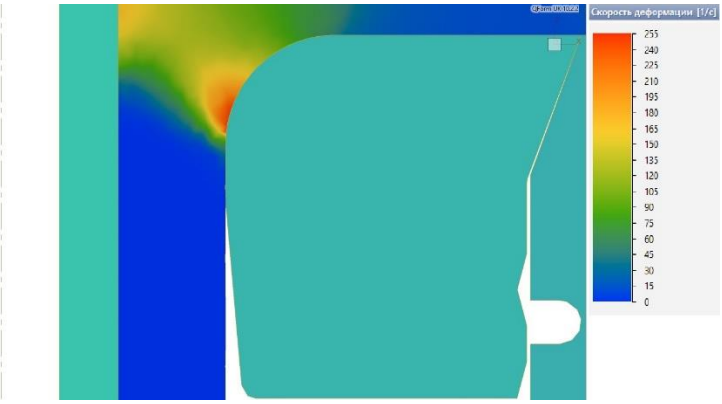


Рисунок 11 - Приклад градієнту швидкості деформації на контакті заготовки з матричним кільцем

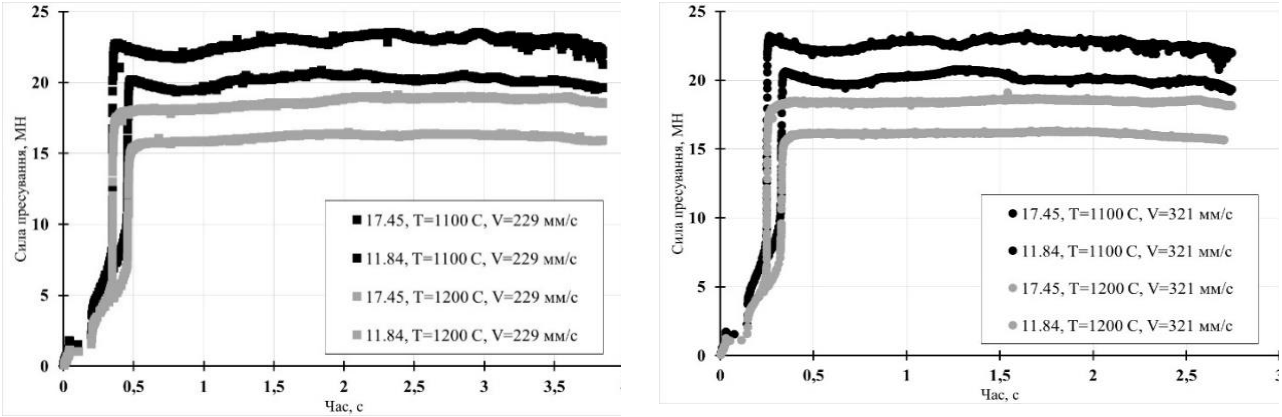


Рисунок 12 - Графіки зміни сили пресування під час перебігу процесу. Швидкість прес-штемпеля : а) 229 мм/с, б) 321 мм/с

Висновки

В роботі виконано теоретичні дослідження впливу коефіцієнту витяжки, початкової температури заготовки та швидкості руху прес-штемпеля на зношування матричного кільця та силу пресування під час процесу пресування труб 60×14 мм та 60×8 мм зі сталі 08Х18Н10Т. Дослідження проведено за методикою повнофакторного експерименту 2^3 з використанням програмного забезпечення QForm UK 10.

Отримано регресійні залежності максимальних значень параметрів зношування матриці та сили пресування від вищезазначених факторів. Показано, що на максимальну температуру на контакті заготовки та матриці приблизно однаковий вплив мають всі розглянуті фактори; максимальний тиск на контакті заготовки та матриці суттєво залежить від коефіцієнту витяжки та початкової температури. Зношування матриці від дотичних напружень суттєво залежить лише від коефіцієнту витяжки; на силу пресування під час стабільного перебігу процесу впливають коефіцієнт витяжки та почат-

кова температури заготовки. Істотного комплексного впливу факторів на розглянуті параметри не визначено.

Розглянуто розподіл температури, тиску та зношування на робочій поверхні матриці. Визначено, що основну долю (≥ 90 %) значення сумарного зношування матриці складає зношування від тиску. Також визначено, що ділянки розподілу максимальних значень зношування та максимальних значень тиску не співпадають. Додатковий аналіз результатів моделювання дозволяє висунути гіпотезу про спільний вплив інтенсивності деформації (або ступеню деформації) та відносної швидкості заготовки на контакті з інструментом на зношування. Дана гіпотеза потребує подальшої теоретичної та експериментальної перевірки.

Аналіз графіків зміни сили пресування під час перебігу процесу підтвердив отримані під час складання рівнянь регресії висновки: в розглянутому інтервалі значень, швидкість пресування не впливає на силу пресування; початкова температура заготовки має більш вагомий, ніж коефіцієнт витяжки, вплив, на силу пресування протягом всього перебігу процесу.

Бібліографічний список

1. Гуляев Г.И. Прессование стальных труб и профилей: учебник / Г.И. Гуляев, А.Е. Притоманов, О.П. Дробич, В.К. Верховод. – М.: Металлургия, 1973. – 192 с.

2. Прозоров Л.В. Прессование стали: учебник/ Л.В. Прозоров. – М.: Металлургия, 1956. – 263 с.

3. Геллер Ю.А. Инструментальные стали: / Ю.А. Геллер. – М.: Металлургия, 1968. – 568 с.

4. Шерба В.Н., Райтбарг Л.Х. Технология прессования металлов: / В.Н. Щерба, Л.Х. Райтбарг. – М.: Металлургия, 1995. – 151 с.

5. Бережной В.Л. Прессование с активным действием сил трения: / В.Л. Бережной, В.Н. Щерба, А.И. Батурин. – М.: Металлургия, 1988. – 296 с.

6. Белашова И.С. Поверхностное упрочнениеинструментальных сталей. Автореф. дис. д-ра техн. наук. - Москва: МАДИ (ГТУ), 2005. - 48 с

7. Цих С.Г., Гришин В.И., Супов А.В., Лисицкий В.Н., Глебова Ю.А. Развитие процесса карбонитрации // Металловедение и термическая обработка металлов. 2010. – №9. – С. 7-12.

8. Агафонова О.О. Методы повышения износостойкости деталей машин / О.О. Агафонова, Е.С. Русин. // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. –№1. –С.120-124.

9. Трусова Е.В. Низкотемпературная нитроцементация штамповых сталей и наплавленных покрытий для повышения долговечности штампового инструмента. Автореф. дис. к-та техн. наук. - Курск: ЮЗГУ, 2011. - 17 с

10. Application of hollow cathode effect for local ion nitriding of machine parts / V.V. Budilov et al. Journal of Physics: Conference Series. - 2015. - Vol. 652. - P. 012052

11. Патент на изобретение № 2413784 МПК – 8 C23C8/36, C21D9/30 от 30.06.2009, 3 с. Способ ионного азотирования стали /Р.М. Киреев, К.Н. Рамазанов, Р.К. Вафин.

12. Межэлектродная плазма вакуумной дуги в атмосфере азота /Н.С. Ломино, В.Д. Овчаренко, Г.Н. Полякова, А.А. Андреев, В.М. Шулаев Сб. докл. 3-й Межд. конф. «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов». – Харьков, 2002. – С. 202-222.

13. Сребрянский Г.А., Стародубцев Ю.Н. Основные принципы совершенствования технологии производства аморфной ленты / Г.А. Сребрянский, Ю.Н. Стародубцев // Сталь. 1991. –№ 9. –С. 73–78.

14. Сребрянский Г.А., Стовпченко А.П. Новый подход к получению порошковых материалов / Materialy V Miedzynarodowa Sasja Naukowa “Nowe Technologiei osiagniecia w metalurgii inzynierii materialowej”, (Польша), Polit-?chnica Czestochowska, Widawnictwo Wipmifs, 2004. – P. 618-621.

15. Пат. на корисну модель № 148695 від 09.09.2021р. Спосіб зміцнення трубопресового інструменту з інструментальної сталі / К.О. Думенко, В.Л. Пінчук, Л.С. Кривчик, О.Б. Загородній, Г.О. Сребрянський.

16. Рахманов С.Р. Некоторые перспективы повышения износостойкости трубопрессового инструмента / С.Р. Рахманов, Г.А. Сребрянский. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2011. –№4 (269). –С. 97-100.

17. Пат. 88755, Україна. Спосіб нанесення покриттів / О.М. Дубовий, Т.А. Янковець, А.А. Карпеченко, О.О. Жданов – № 200902658; заявл. 23.03.2009; опубл. 10.11.2009, бюл. №21. 2009.

18. А.С 1504569 СССР, УДК 620.178.16. Способ определения износа инструмента / В.И. Хомяк, Г.Н. Красовский, заявл. 11.01.88.

19. А.с. 679277 СССР, УДК 621.777.073. Матрица для прессования труб/ В.Ф. Степанов, В.В. Тарасов, А.Н. Шамшурин, заявл. 15.04.1976.

20. Манегин Ю.В. Горячее прессование труб и профилей: / Ю.В. Манегин, А.Е. Притоманов, Т. Шпиттель, А.М. Кнаушнер. – М.: Металлургия, 1980. – 272 с.

21. QForm UK – Software for simulation and optimization of metal forming processes and metal profile extrusion, QFX Simulations Ltd., http://www.qform3d.com/

22. QForm UK V10© Help

23. Implementation of a Dual Mesh Method for Longitudinal Rolling in QForm V8 / D. Gerasimov et al. Materials Science Forum. 2016. Vol. 854. P. 158–162. URL: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.854.158

24. Machinery bulding. Encyclopedia/ Macines and mechanism. Structural strength. Friction, wearing, lubricants. V IV-1. [in Russian] D.N. Reshetov, A.P. Gusenkov, Yu.P. Drozdov et.c. : M.: Mashinarybuilding, 1995.

25. Levanov A.N. Improvement of metal forming processes by means of useful effects of plastic friction. Journal of Materials Processing Technology. 1997. Vol. 72. P. 314–316. DOI: 10.1016/S0924-0136(97)00191-X

26. Пинчук С.И. Основы научных исследований и организация эксперимента (раздел «Планирование эксперимента»). Конспект лекций для студентов специальностей: 7.090401, 7.090103. – Днепропетровск: НМетАУ, 2002. – 62 с.

References

1. Gulyayev G.I. Pressovaniye stal'nykh trub i profiley: uchebnik / G.I. Gulyayev, A.Ye. Pritomanov, O.P. Drobich, V.K. Verkhovod. – M.: Metallurgiya, 1973. – 192 s.

2. Prozorov L.V. Pressovaniye stali: uchebnik/ L.V. Prozorov. – M.: Metallurgiya, 1956. – 263 s.

3. Geller YU.A. Instrumental'nyye stali: / Yu.A. Geller. – M.: Metallurgiya, 1968. – 568 s.

4. Sherba V.N., Raytbarg L.Kh. Tekhnologiya pressovaniya metallov: / V.N.Shcherba, L.KH.Raytbarg. – M.: Metal-?urgiya, 1995. – 151 s.

5. Berezhnoy V.L. Pressovaniye s aktivnym deystviyem sil treniya: / V.L. Berezhnoy, V.N. Shcherba, A.I. Baturin. – M.: Metallurgiya, 1988. – 296 s.

6. Belashova I.S. Poverkhnostnoye uprochneniyeinstrumental'nykh staley. Avtoref. dis. d-ra tekhn. nauk. - Moskva: MADI (GTU), 2005. - 48 s

7. Tsikh S.G., Grishin V.I., Supov A.V., Lisitskiy V.N., Glebova YU.A. Razvitiye protsessa karbonitratsi // Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov. 2010. – №9. – S. 7-12.

8. Agafonova O.O. Metody povysheniya iznosostoykosti detaley mashin / O.O. Agafonova, Ye.S. Rusin. // Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. –№1. –S.120-124.

9. Trusova Ye.V. Nizkotemperaturnaya nitrotsementatsiya shtampovykh staley i naplavlennykh pokrytiy dlya povys-?eniya dolgovechnosti shtampovogo instrumenta. Avtoref. dis. k-ta tekhn. nauk. - Kursk: YUZGU, 2011. - 17 s.

10. Application of hollow cathode effect for local ion nitriding of machine parts / V.V. Budilov et al. Journal of Physics: Conference Series. - 2015. - Vol. 652. - P. 012052

11. Patent na izobreteniye № 2413784 MPK – 8 S23S8/36, S21D9/30 ot 30.06.2009, 3 s. Sposobionnogo azotirovaniya stali /R.M. Kireyev, K.N. Ramazanov, R.K. Vafin.

12. Mezhelektrodnaya plazma vakuumnoy dugi v atmosfere azota /N.S. Lomino, V.D. Ovcharenko, G.N. Polyakova, A.A. Andreyev, B.M. Shulayev Sb. dokl. 3-y Mezhd. konf. «Oborudovaniye i tekhnologii termicheskoy obrabotki metallov i splavov». – Khar'kov, 2002. – S. 202-222.

13. Srebryanskiy G.A., Starodubtsev YU.N. Osnovnyye printsipy sovershenstvovaniya tekhnologii proizvodstva amorfnoy lenty / G.A. Srebryanskiy, YU.N. Starodubtsev // Stal'. 1991. –№ 9. –C. 73–78.

14. Srebryanskiy G.A., Stovpchenko A.P. Novyy podkhod k polucheniyu poroshkovykh materialov / Materia ly V Miedzynarodowa Sasja Naukowa “Nowe Technologiei osiagniecia w metalurgii inzynierii materialowej”, (Польша), Poli t-?chnica Czestochowska, Widawnictwo Wipmifs, 2004. –P. 618-621.

15. Pat. na korysnu model' № 148695 vid 09.09.2021r. Sposib zmitsnennya trubopresovoho instrumentu z instrumental'noyi stali / K.O. Dumenko, V.L. Pinchuk, L.S. Kryvchyk, O.B. Zahorodniy, H.O. Srebryans'kyy.

16. Rakhmanov S.R. Nekotorye perspektyvy povyshenyya yznosostoykosty trubopressovoho ynstrumenta / S.R. Rakhmanov, H.A. Srebryanskyy. // Metallurhycheskaya yhornorudnaya promyshlennost'. – 2011. –№4 (269). –S. 97-100.

17. Pat. 88755, Ukrayina. Sposib nanesennya pokryttiv / O.M. Dubovyy, T.A. Yankovets', A.A. Karpechenko, O.O. Zhdanov – № 200902658; zayavl. 23.03.2009; opubl. 10.11.2009, byul. №21. 2009.

18. A.S 1504569 SSSR, UDK 620.178.16. Sposob opredelenyya yznosa ynstrumenta / V.Y. Khomyak, H.N. Kr aso-?skyy, zayavl. 11.01.88.

19. A.s. 679277 SSSR, UDK 621.777.073. Matrytsa dlya pressovanyya trub/ V.F. Stepanov, V.V. Tarasov, A.N. Shamshuryn, zayavl. 15.04.1976.

20. Manehyn YU.V. Horyachee pressovanye trub y profyley: / YU.V. Manehyn, A.E. Prytomanov, T. Shpyttel', A.M. Knaushner. – M.: Metallurhyya, 1980. – 272 s.

21. QForm UK – Software for simulation and optimization of metal forming processes and metal profile extrusion, QFX Simulations Ltd., http://www.qform3d.com/

22. QForm UK V10© Help

23. Implementation of a Dual Mesh Method for Longitudinal Rolling in QForm V8 / D. Gerasimov et al. Materials Science Forum. 2016. Vol. 854. P. 158–162. URL: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.854.158

24. Machinery bulding. Encyclopedia/ Macines and mechanism. Structural strength. Friction, wearing, lubricants. V IV-1. [in Russian] D.N. Reshetov, A.P. Gusenkov, Yu.P. Drozdov et.c. : M.: Mashinarybuilding, 1995.

25. Levanov A.N. Improvement of metal forming processes by means of useful effects of plastic friction. Journal of Materials Processing Technology. 1997. Vol. 72. P. 314–316. DOI: 10.1016/S0924-0136(97)00191-X

26. Pinchuk S.I. Osnovy nauchnykh issledovaniy i organizatsiya eksperimenta (razdel «Planirovaniye eksperimenta»). Konspekt lektsiy dlya studentov spetsial'nostey: 7.090401, 7.090103. – Dnepropetrovsk: NMetAU, 2002. – 62 s.

УДК 531.1

Добров І.В., Семичев А.В.

Розрахунково-аналітичний метод визначення кінематичних та енергосилових параметрів кривошипно-повзунного механізму (Повідомлення 1. Кінематика)

Метою роботи є розробка алгоритму та програми розрахунку енергосилових параметрів кривошипно-повузнного механізму з урахуванням апробованих на практиці та добре зарекомендованих себе: аналітичного методу розрахунку кінематики повзуна та графо-аналітичного методу розрахунку силових параметрів кривошипно-повузнного механізму.
Результати досліджень. Розроблено новий метод розрахунку та алгоритм визначення енергосилових параметрів кривошипно-повузнного механізму для персональних комп'ютерів.
Наукова новизна. Новий метод розрахунку та алгоритм визначення енергосилових параметрів відрізняється визначенням координат точок механізму та вирішенням рівнянь графічним методом.
Практична значимість. Створений алгоритм дозволяє виконати попередню оцінку енергосилових 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 конкурентоспроможної продукції.
Ключові слова: кривошипно-повзунний механізм, енергосилові параметри, алгоритм, програма розрахунку.
The purpose of the work is to develop an algorithm and a program for calculating the power parameters of the crank-slider mechanism, takinginto 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. A new calculation method and an algorithm for determining the power parameters of the crank-slider mechanism for personal computers is developed.
Scientific novelty. The newcalculation method and algorithm for determining power parameters is characterized by the determination of the coordinates of the mechanism points and the solution of equations by a graphical method.
Practical significance. The created algorithm makes it possible to perform a preliminary assessment of the power parameters of mechanisms and aggregates usingcrank-slider mechanisms at the stage of technological design, technical and economic calculation of newaggregates or modernization of existing equipment when changing technological regimes associated with the production of modern competitive products.
Key words: crank-slider mechanism, power parameters, algorithm, calculation program.

Кривошипно-повзунні механізми (далі – КПМ), є представниками однієї з п'яти основних видів асурових груп 2-го класу 2-го порядку, які використовуються під час структурного аналізу різних складних механізмів [1-3]. Крім цього, такі механізми є частиною різних швидкохідних машин, робота яких вимагає урахування сил інерції і моменту сил інерції ланок механізму [1,3]. Такі вимоги визначають подальше вдосконалення розрахункових методів визначення кінематичних й енергосилових параметрів КПМ на основі широкого впровадження КПМ й універсальних прикладних програм MathCAD, MathLAB тощо.

Метою роботи є розробка алгоритму розрахунку кінематичних параметрів КПМ для прикладної програми MathCAD з урахуванням розроблених та апробованих аналітичного і графоаналітичного методів розрахунку кінематики ланок КПМ [1, 2], які мають як самостійне значення під час дослідження кінематики пласких стрижневих механізмів, так і є основою для кінестетичного дослідження КПМ у складі машин з різним призначенням.

Розглянемо (рис. 1) схему механізму КПМ, який має кривошип (ланка 1) довжиною $l_1 = l_{0A}$ і на рис. 1 позначений відрізком $0A$, рухливо (за допомогою шарнірів 0 й A) з'єднаний з нерухливою основою і шатуном (ланка 2) довжиною $l_2 = l_{AB}$ (відрізок AB на рис. 1) [4].

Кривошип l_1 рівномірно обертається з кутовою швидкістю ω_1 (у напрямку обертання годинникової стрілки) відносно центра шарніра 0, закріпленого на нерухомій основі 4. Шатун 2 здійснює плоскопаралельний рух за рахунок того, що за допомогою шарніра B шатун 2 пов'язаний з повзуном (ланка 3), розташованим у нерухомій напрямній основі 4, і робить зворотно-поступальний рух уздовж осі. При цьому центр системи координат $X0Y$ сполучений із центром осі обертання шарніра 0, а вісь $0X$ спрямована протилежно до напрямку лінії дії технологічного опору $P_{3,Q}$ (штрихпунктирна стрілка на рис. 1) при робочому ході повзуна 3. Центр маси повзуна m_3 сполучено із центром шарніра B. Центр маси шатуна m_2 позначено точкою S_2 і розташовано на відстані l_{AS_2} від шарніра A шатуна l_{AB} (відрізок AS_2 на рис. 1). Центр маси кривошипа m_1 умовно розташовуємо в центрі шарніра 0.

Добров І.В.,	
Семичев А.В.	

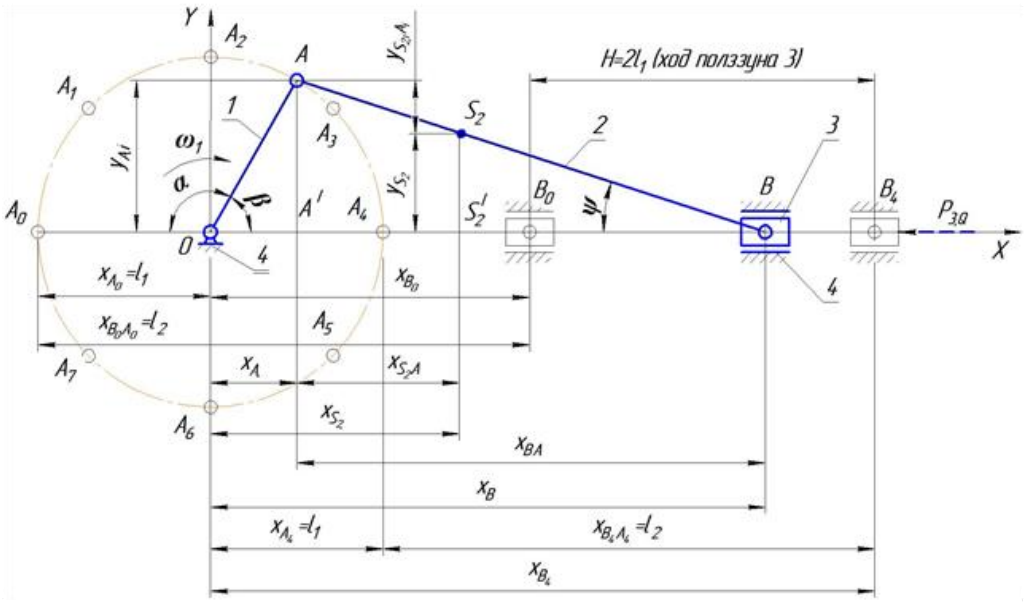


Рис. 1. Кінематична схема кривошипно-повзунного механізму

Візьмемо за початок відліку ($t_0 = 0$) поточних положень ланок механізму КПМ положення початкової ланки-кривошипа 1, коли центр шарніра A, що робить рух по колу радіусом l_{0A} (штрихпунктирне коло) з установленим проміжними положеннями точки A ($A_0 - A_1 - A_2 - A_3 - A_4 - ... - A_7 - A_0$), перебуватиме в положенні A_0 з координатами: $x_{A_0} = -l_1 \cos\alpha = -l_1 \cos(\omega_1 t_0) = -l_1$, $y_{A_0} = 0$.

Координата повзуна 3 на осі 3 в цьому положенні КПМ складає $x_{B_0} = x_{A_0} + x_{B_0A_0} = -l_1 + l_2 = l_2 - l_1$ і визначає початок робочого ходу, при якому повзун долає зовнішній технологічний опір, що діє на нього. Під час повороту кривошипа 1 на кут $\alpha = 0{,}5\omega_1 T = \pi$ (T - період обертання кривошипа) точка шарніра A на траєкторії свого руху стане у крайнє положення уздовж осі $0X$ і буде розміщена в точці A_4 з координатами: $x_{A_4} = -l_1 \cos(\pi) = l_1$; $y_{A_4} = 0$. Відповідно крайнє положення повзуна 3 наприкінці робочого ходу визначає координата $x_{B_4} = x_{A_4} + l_2 = l_1 + l_2$.

У цьому випадку хід (H) повзуна 3 становитиме:

$$H = x_{B_4} - x_{B_0} = l_1 + l_2 - (l_2 - l_1) = 2l_1 \quad (1)$$

Поточне положення кривошипа визначає кут $\alpha = \omega_1 t$, де t – час повороту кривошипа з початкового положення в поточне положення (відрізок $0A$ на рис. 1).

У поточному положенні кривошипа координати точки A кривошипа 2 становлять:

$$x_A = -l_1 \cos\alpha; \quad (2)$$

$$y_A = l_1 \sin\alpha. \quad (3)$$

Відповідно координати поточного положення повзуна 3 (точки B) уздовж нерухливих горизонтальних напрямних 4 складуть:

$$x_B = 0A' + A'B = x_A + x_{BA} = x_A + AB\cos\psi = -l_1 \cos\alpha + l_2 \cos\psi; \quad (4)$$

$$x_B = 0A' + A'B = x_A + x_{BA} = x_A + AB\cos\psi = -l_1 \cos\alpha + l_2 \cos\psi. \quad (5)$$

Урахувавши, що $l_1 \sin\alpha = y_B = A'A = l_2 \sin\psi$, отримаємо $\sin\psi = \frac{l_1}{l_2}\sin\alpha = \lambda \sin\alpha$. Звідси [1, 2]:

$$\cos\psi = \sqrt{1-(\sin\psi)^2} = \sqrt{1-(\frac{l_1}{l_2}\sin\alpha)^2} = \sqrt{1-\lambda^2(\sin\alpha)^2} \approx 1 - 0{,}5\lambda^2(\sin\alpha)^2 \quad (6)$$

де $\lambda = \frac{l_1}{l_2}$ при $\lambda \sin\alpha << 1$.

Підставимо (6) у (4) й отримаємо [1, 4]:

$$x_B = 0A' + A'B = x_A + l_2 \cos\psi = l_2\sqrt{1-\lambda^2(\sin\alpha)^2} - l_1\cos\alpha \approx l_2(1-0{,}5\lambda^2(\sin\alpha)^2) - l_1\cos\alpha \quad (7)$$

.

З подібності трикутників $\Delta AA'B$ і $\Delta S_2 S_2' B$ визначаємо координати центра маси шатуна:

$$y_{S_2} = y_A\frac{BS_2}{AB} = y_A\frac{AB-AS_2}{AB} = l_1\sin\alpha\frac{l_2 - l_{S_2A}}{l_2} = \frac{1}{\lambda}(l_2 - l_{S_2A})\sin\alpha \quad (8)$$

Далі [1, 4]:

$$x_{S_2} = x_A + x_{S_2A} = x_A + l_{S_2A}\cos\psi = -l_1\cos\alpha + l_{S_2A}\sqrt{1-\lambda^2(\sin\alpha)^2} \approx \quad (9)$$

$$\approx l_{S_2A}(1-0{,}5\lambda^2(\sin\alpha)^2) - l_1\cos\alpha$$

.

Розглянемо (рис. 2) розподіл лінійних і кутових швидкостей ланок КПМ у поточному положенні КПМ із огляду на [1], що лінійна швидкість шарніра A кривошипа 1 і шарніра B повзуна 3 визначають величини:

$$v_A = \omega_1 l_1; \quad (10)$$

$$v_B = \frac{dx_B}{dt} = \frac{dx_B}{d\alpha}\frac{d\alpha}{dt} = \omega_1\frac{dx_B}{d\alpha} \approx \omega_1 l_2\lambda(\sin\alpha - 0{,}5\lambda\sin(2\alpha)) \quad (11)$$

.

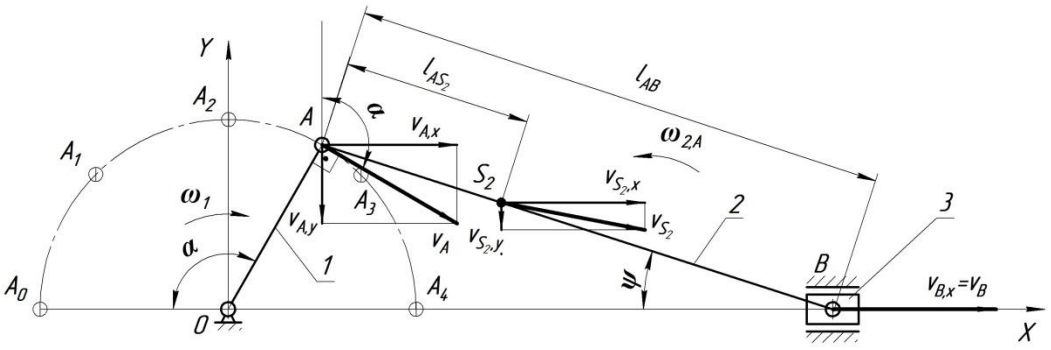


Рис. 2. Розподіл лінійних і кутових швидкостей ланок КПМ

Проєкції лінійних швидкостей шарнірів A і B на осі координат $X0Y$ становлять:

$$v_{A,x} = v_A\sin\alpha; \quad (12)$$

$$v_{A,y} = v_A\cos\alpha; \quad (13)$$

$$v_{B,x} = v_B; \quad (14)$$

$$v_{B,y} = 0. \quad (15)$$

Проєкції швидкості (v_{S_2}) центра маси m_2 шатуна 2, розташованого на відстані l_{S_2A} між шарнірами A й B, при відомих (12)-(15) значеннях проєкцій швидкостей у цих шарнірах складуть:

$$v_{S_2,x} = v_{A,x} + (v_{B,x} - v_{A,x})\frac{l_2 - l_{S_2A}}{l_2}; \quad (16)$$

$$v_{S_2,y} = (v_{B,y} - v_{A,y})\frac{l_2 - l_{S_2A}}{l_2}. \quad (17)$$

З (16), (17) походить визначення лінійної швидкості центра маси m_2 шатуна 2

$$v_{S_2} = \sqrt{(v_{S_2,x})^2 + (v_{S_2,y})^2}. \quad (18)$$

Проєкції відносної швидкості (v_{BA}) шарніра v_{BA} щодо шарніра A для шатуна 2 складуть:

$$v_{BA,x} = v_{B,x} - v_{A,x} = v_B - v_{A,x} \tag{19}$$

$$v_{BA,y} = v_{B,y} - v_{A,y} = -v_{A,y} \tag{20}$$

Відповідно відносна швидкість шарнірів A і шатуна B буде дорівнювати

$$|v_{BA}| = \sqrt{(v_{BA,x})^2 + (v_{BA,y})^2} \tag{21}$$

Величина $|v_{BA}|$ і напрямок $\bar{v}_{BA,y}$ у свою чергу визначають величину і напрямок кутової швидкості $\omega_{2,A}$ шатуна 2 в поточному положенні ланок КПМ (рис. 2).

$$\omega_{2,A} = \frac{v_{A,y}}{|v_{A,y}|}\frac{|v_{BA}|}{l_2} = \begin{cases} \omega_{2,A} > 0 \text{ й обертання } \omega_{2,A} \text{ у напрямі } \omega_1; \\ \omega_{2,A} < 0 \text{ й обертання } \omega_{2,A} \text{ протилежно} \\ \omega_1. \end{cases} \tag{22}$$

Розглянемо (рис. 3) розподіл лінійних і кутових прискорень ланок КПМ у поточному положенні КПМ, враховуючи [3, 4], що лінійні прискорення рівномірно обертового шарніра A, кривошипи 1 і поступально переміщуваного повзуна 3 визначають величини:

$$a_A = \omega_1^2 l_1 \tag{23}$$

$$a_B = \frac{dv_B}{dt} = \frac{dv_B}{d\alpha}\frac{d\alpha}{dt} = \omega_1^2 \frac{dv_B}{d\alpha} \approx \omega_1^2 l_2 \lambda(\cos\alpha - \lambda\cos(2\alpha)) \tag{24}$$

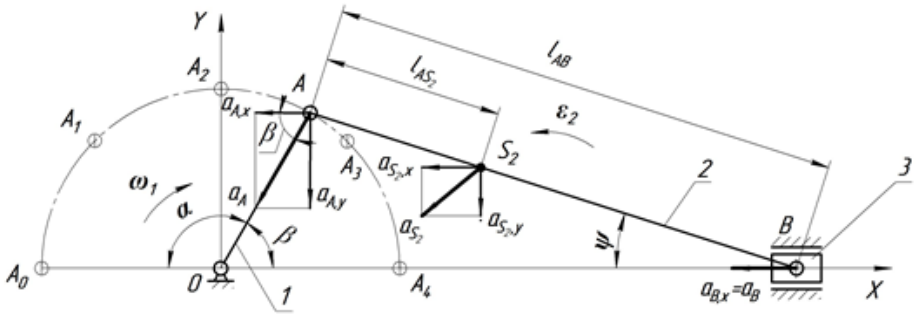


Рис 3. Розподіл лінійних і кутових прискорень ланок КПМ

У поточному положенні КПМ проєкції лінійних прискорень шарнірів A і B на осі координат $X0Y$ складуть:

$$a_{A,x} = a_A \cos\beta = -a_A \cos(\pi - \alpha) = a_A \cos\alpha \tag{25}$$

$$a_{A,y} = a_A \sin\beta = -a_A \sin(\pi - \alpha) = -a_A \sin\alpha \tag{26}$$

$$a_{B,x} = a_B; \tag{27}$$

$$a_{B,y} = 0. \tag{28}$$

Проєкції прискорення (a_{S_2}) центра маси m_2 шатуна 2, розташованого на відстані l_{S_2A} між шарнірами A й B, за відомих (25)–(28) значень проєкцій прискорень у цих шарнірах складуть:

$$a_{S_2,x} = a_{A,x} + \frac{a_{B,x} - a_{A,x}}{l_2} l_{S_2A}; \tag{29}$$

$$a_{S_2,x} = a_{A,x} + \frac{a_{B,x} - a_{A,x}}{l_2} l_{S_2A}. \tag{30}$$

З (16), (17) прискорення центра маси шатуна визначаємо так:

$$|a_{S_2}| = \sqrt{(a_{S_2,x})^2 + (a_{S_2,y})^2} \tag{31}$$

Проєкції відносного прискорення (a_{BA}) шарніра B щодо шарніра A для шатуна 2 складуть:

$$a_{BA,x} = a_{B,x} - a_{A,x} = a_B - a_{A,x}, \quad (32)$$

$$a_{BA,y} = a_{B,y} - a_{A,y} = -a_{A,y}. \quad (33)$$

Відповідно відносне прискорення шарнірів A і B шатуна 2 буде дорівнювати:

$$|a_{BA}| = \sqrt{(a_{BA,x})^2 + (a_{BA,y})^2} \quad (34)$$

Визначимо нормальне прискорення шарніра B щодо шарніра A шатуна 2

$$a_{BA}^n = \omega_{2,A}^2 l_2. \quad (35)$$

З (34), (35) визначаємо тангенціальне прискорення шарніра B щодо шарніра A шатуна 2:

$$\left|a_{BA}^\tau\right| = \sqrt{(a_{BA})^2 - (a_{BA}^n)^2} \quad (36)$$

Використовуючи величину $\left|a_{BA}^\tau\right|$ і напрямок $a_{BA,y}$ визначаємо величину і напрямок кутового прискорення $\varepsilon_{2,A}$ шатуна 2 в поточному положенні ланок КПМ (рис. 3):

$$\varepsilon_{2,A} = \frac{a_{A,y}}{\left|a_{A,y}\right|}\frac{a_{BA}^\tau}{l_2} = \begin{cases} \varepsilon_{2,A} > 0 \text{ і напрям } \varepsilon_{2,A} \text{ збігається з напрямом } \omega_1; \\ \varepsilon_{2,A} < 0 \text{ і напрям } \varepsilon_{2,A} \text{ протилежний до напряму } \omega_1. \end{cases} \quad (37)$$

Нижче подано результати розрахунку кінематичних параметрів КПМ із використанням розробленого алгоритму і програмного забезпечення MathCAD (рис. 3) для різних поточних положень ланок КПМ (табл. 1) відповідно до поточного положення ($A_0 - A_1 - A_2 - A_3 - A_4 - \ldots - A_7 - A_0$) точки A кривошипа. На рис. 4 представлено графіки залежності $s_B(\alpha), v_B(\alpha), a_B(\alpha)$, розраховані відповідно до запропонованої прикладної програми MathCAD. Ідентичність наведених графіків графікам, представленим у технічній літературі [1, 2], побічно підтверджує правомірність розрахунків інших кінематичних параметрів ($\omega_2(\alpha), a_{S_2}(\alpha), \varepsilon_2(\alpha)$) КПМ, які є одними з вихідних даних для кінестетичного розрахунку ланок КПМ на міцність і визначення потужності приводу КПМ, розрахунку розмірів маховика приводу машини, що містить кривошипно-повзунний механізм.

Вихідні дані КПМ:

$$l_1 = 0{,}1м; l_2 = 0{,}286м; l_{S_2A} = 0{,}1м; \omega_1 = 29{,}3c^{-1}.$$

Таблиця

Результати розрахунку кінематичних параметрів у 8-ми положеннях кривошипа

Положення кривошипа 1	Кут повороту кривошипа 1, α, *град*	Переміщення повзуна 3 (точки B), $s_B = x_B - x_{B_0}$, *м*	Швидкість повзуна 3 (точки B), v_B, *м/с*	Прискорення повзуна 3 (точки B), a_B, *м/с²*	Прискорення маси шатуна 2 (точки S_2), a_{S_2}, *м/с²*	Кутова швидкість оберту шатуна 2 ω_2, *с⁻¹*	Кутове прискорення оберту шатуна 2 ε_2, *с⁻²*
0	0	0	0	58,377	76,234	9,376	0
1	45	0,021	1,603	60,704	72,401	6,797	-188,679
2	90	0,083	2,93	27,472	56,624	0	-288,44
3	135	0,162	2,541	-60,704	72,401	-6,797	-188,679
4	180	0,2	0	-113,321	95,464	-9,376	0
5	225	0,162	-2,541	-60,704	72,401	-6,797	188,665
6	270	0,083	-2,93	27,472	56,624	0	288,44
7	315	0,021	-1,603	60,704	72,401	6,797	188,679
8	360	0	0	58,377	76,234	9,376	0

Висновки. Розроблено новий метод розрахунку й алгоритм визначення кінематичних параметрів КПМ для персональних ПМК з використанням стандартних прикладних програм MathCAD, MathLAB,

що дозволяє розширити кінематичні дослідження машин різного призначення.
ланок механізму в процесі його роботи у складі

ЛІТЕРАТУРА (не перекладено)

1. Кожевников С.Н. Теория механизмов и машин / С.Н. Кожевников. – М.: Машиностроение, 1973. – 592 с.
2. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин / И.И. Артоболевский. – М.: Наука, 1975. – 640 с.
3. Козловский М.З. Теория механизмов и машин / [М.З.Козловский, А.Н.Евграфов, Ю.А.Семёнов, А.В.Слоущ]. – М.: Академия, 2013. – 560 с.
4. Добров И.В. Расчетно-аналитический метод определения кинематических параметров кривошипно-ползунного механизма / И.В. Добров, А.В. Семичев // Материалы VI Международной научно-практической конференции «Сучасні технології промислового комплексу – 2020» (8–12 сентября 2020 г.). – Херсон: ХНТУ. – С. 100–105.

УДК 621.742

Лютий Р.В., Тишковець М.В., Осипенко І.О., Мисливченко О.М.

Технологічний рециклінг стрижневої суміші на основі фосфатів натрію

Liutyi R., Tyshkovets M., Osypenko I., Myslyvchenko A.

Technological recycling of core mixture based on sodium phosphates

Анотація. *Вперше представлено результати досліджень властивостей стрижневої суміші на основі неорганічного зв'язувального компонента, здатної до повторного використання.*
У роботі використано зв'язувальний компонент, який утворюється внаслідок неорганічного хімічного синтезу із ортофосфорної кислоти та триполіфосфату натрію. Потенційно використання такого матеріалу в ливарному виробництві сприяє вилученню фосфатів натрію із побутової хімії та значному покращенню екології водних екосистем.
Попередніми дослідженнями встановлено, що цей зв'язувальний компонент забезпечує високу міцність стрижневої суміші. У представленій статті додатково вивчено такі властивості як залишкова міцність, вибиваємість та можливість повторного використання суміші.
Визначено, що під час нагрівання зв'язувальний компонент має ряд фізико-хімічних перетворень, які полягають у переході полі- та піросфосфатів натрію у метафосфати (200…250 °С), їх подальшому плавленні та зміні кристалічної форми на аморфну (500…600 °С). Внаслідок цього стрижнева суміш після нагрівання та охолодження зберігає відносно високу міцність. Однак, завдяки водорозчинності фосфатів натрію, ливарні стрижні із внутрішніх порожнин виливків легко вилучаються у воді, незалежно від значень залишкової міцності суміші.
Усунення негативного впливу фосфатів натрію на водні екосистеми, незважаючи на використання води для вилучення ливарних стрижнів, досягається тим, що зв'язувальний компонент після розчинення у воді повторно проявляє зв'язувальну здатність, тобто суміш здатна до технологічного рециклінгу та багаторазового використання у замкненому виробничому циклі без витоку до навколишнього середовища.
Ключові слова: *ВИБИВАЄМІСТЬ, ВИЛИВОК, ЗАЛИШКОВА МІЦНІСТЬ, СТРИЖЕНЬ, СТРИЖНЕВА СУМІШ, ФАЗОВИЙ АНАЛІЗ, ФОСФАТИ НАТРІЮ*

Abstract. *For the first time, the results of research into the properties of a core mixture based on an inorganic binder capable of repeated use are presented.*
The work uses a binder that is formed as a result of inorganic chemical synthesis from orthophosphoric acid and sodium tripolyphosphate. The potential use of such material in foundry production contributes to the removal of sodium phosphates from household chemicals and significantly improves the ecology of aquatic ecosystems.
Previous studies have established that this binder provides high strength of the core mixture. In the presented article, such properties as residual strength, knocking-out and the possibility of repeated use of the mixture were additionally studied.
It was determined that during heating, the biner undergoes a number of physicochemical transformations. They consist in the transition of sodium polyphosphates and pyrophosphates into sodium metaphosphates (200...250 °C), their subsequent melting and change of the crystalline form to amorphous (500...600 °C). As a result, the core mixture retains relatively high strength after heating and cooling. However, due to the water solubility of sodium phosphates, the casting cores from the inner cavities of the castings are easily removed in water, regardless of the values of the residual strength of the mixture.
The elimination of the negative impact of sodium phosphates on aquatic ecosystems is achieved by the fact that the binder, after dissolving in water, again exhibits binding ability. That is, the mixture is capable of technological recycling and repeated use in a closed production cycle without leakage to the environment.
Keywords: *KNOCKING-OUT, CASTING, RESIDUAL STRENGTH, CORE, CORE MIXTURE, PHASE ANALYSIS, SODIUM PHOSPHATES*

Аналіз літературних даних та постановка проблеми.

Фосфати натрію є принципово новими зв'язувальними матеріалами для ливарного виробництва. У наших попередніх дослідженнях визначено фізико-хімічні особливості їх отримання [1], а також комплекс основних показників стрижневих сумішей з ними [2]. Відзначено високу міцність, на рівні з синтетичними смолами і рідким склом, а також низьку схильність до утворення пригару на виливках із сталі та чавуну.

Для встановлення перспектив подальшого використання сумішей із фосфатами натрію актуальним є дослідження їх вибиваємості, адже відомо, що фосфати натрію мають невисоку термічну стійкість та температуру плавлення [3-5]. Теоретично можливим є процес спікання ливарних стрижнів у контакті з виливками із відповідним збереженням високої залишкової міцності, як відбувається у разі використання рідкого скла [6].

З іншого боку, фосфати натрію є водорозчинними [7], і теоретично можливим є вилучення стрижнів із виливків за допомогою води. В такому разі слід унеможливити потрапляння цих фосфатів до водних екосистем, що призводить до ряду відомих негативних наслідків [8, 9]. Ливарне підприємство, звісно, може забезпечити систему захисту від витоку шкідливих речовин, але в

Лютий Р.В.,	
Тишковець М.В.,	
Осипенко І.О.,	
Мисливченко О.М.	

найкращому варіанті слід розглянути можливості повторного використання фосфатів натрію.

Мета і завдання досліджень.

Таким чином, метою дослідження є визначення залишкової міцності стрижневої суміші з фосфатом натрію, дослідження варіантів вилучення стрижнів із литих деталей та встановлення можливості повторного використання зв'язувального компонента (ЗК).

В процесі досліджень поставлено наступні завдання:

1. Дослідити залишкову міцність стрижневої суміші після нагрівання до різних температур в межах від 400 до 900 °С.

2. Дослідити вплив води на стан стрижневої суміші після високотемпературного нагрівання для встановлення можливості вилучення стрижнів під час витримки литих деталей у воді.

3. На основі визначення міцності зразків, виготовлених із оборотної стрижневої суміші після її високотемпературного нагрівання, дослідити перспективи повторного використання зв'язувального компонента.

4. Навести рекомендації щодо галузей застосування дослідженої суміші та особливостей технології вилучення стрижнів із литих деталей, виготовлених із різних сплавів.

Матеріали та методи дослідження.

В роботі виготовляли стандартні зразки стрижневої суміші для визначення міцності при розриванні. Наповнювачем суміші використано річковий кварцовий пісок марки $3К_5О_3025$.

Отримання фосфатного ЗК здійснено за попередньо розробленою технологічною схемою. Використано ортофосфорну кислоту в вигляді водного розчину з концентрацією 85% (виробництва Китаю) та триполіфосфат натрію $Na_5P_3O_{10}$ технічної чистоти. ЗК приготовлено у вигляді сухої композиції (1 мас. ч. кислоти та 5 мас. ч. триполіфосфату натрію), яку було витримано протягом 1 год при температурі 150 °С. Структуру і склад утвореного ЗК наведено на рис. 1.

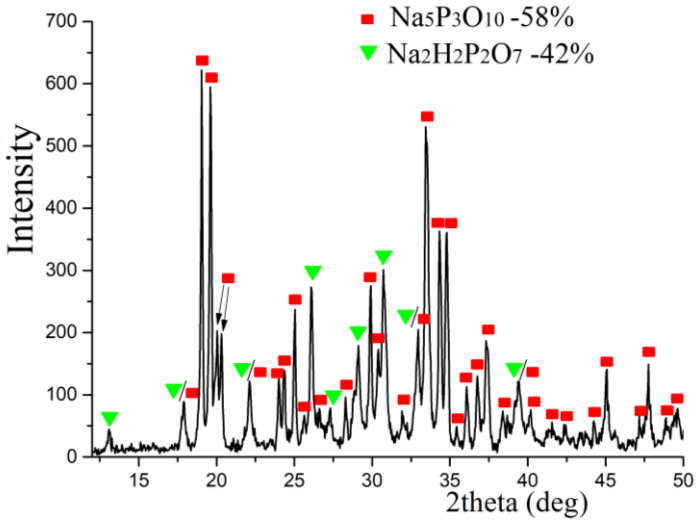


Рисунок 1 – Дифрактограма зв'язувального компонента, утвореного із 5 мас. ч. $Na_5P_3O_{10}$ та 1 мас. ч. H_3PO_4

Як видно із результатів кількісного фазового аналізу, майже половина триполіфосфату натрію після хімічної взаємодії з ортофосфорною кислотою перетворилася на двозаміщений пірофосфат натрію. Саме він забезпечує значне підвищення міцності стрижневої суміші.

До складу суміші увійшло 5% вказаного ЗК, 5% води, решта – кварцовий пісок. Тривалість перемішування компонентів складала 2 хв.

Зразки сушили в лабораторній камерній електропечі моделі СНОЛ-1,6.2,5/11-И2.

З метою визначення залишкової міцності зразків їх нагрівали в муфельній печі електроопору моделі СНОЛ-1,6 ТУ 16-531.704-81.

Зразки розміщували у печі, після чого температуру піднімали до першого експериментального значення – 400 °С. Після досягнення цієї температури проводили ізотермічну витримку протягом 30 хв для наскрізного рівномірного прогрівання зразків та діставали партію (4…5 зразків) із печі. Температуру в печі піднімали до 500 °С, а вилучені зразки після їх повного охолодження випробовували на міцність. Таким чином було визначено залишкову міцність після нагрівання також до 600, 700, 800 і 900 °С.

Міцність при розриванні визначали на приладі моделі 081, який було модифіковано для визначення міцності до 3,0 МПа.

Залишки зразків після їх випробування на залишкову міцність були поступово поміщені у холодну воду. Спершу розміщували зразки, які було нагріто до 400 °С, та визначали тривалість їх знеміцнення у воді. Факт знеміцнення відповідав тому моменту, коли зразки руйнувались у водному середовищі без додаткового навантаження, після доторкання до них. Після цього у воді розміщували зразки, які було нагріто до 500 °С і всі наступні партії.

Після експериментів з усіма зразками із суміші повторно робили зразки, які сушили при темпера-

турі 150 °С та визначали міцність з метою встановлення можливості повторного використання дослідженого ЗК.

Структуру і фазовий склад визначали рентгенофазовим аналізом на дифрактометрі RIGAKU моделі “Ultima IV”.

Високотемпературні перетворення досліджували методом диференційного термогравіметричного аналізу з використанням синхронного термічного аналізатора STA 449 C Jupiter.

Результати дослідження та їх обговорення.

З метою встановлення потенційної вибиваємості ливарних стрижнів було визначено початкову та залишкову міцність зразків стрижневої суміші. Початкову міцність визначено після сушіння зразків при 150 °С та їх повного охолодження. Залишкову міцність визначали після нагрівання в межах від 400 до 900 °С та повного охолодження. Результати показано на рис. 2.

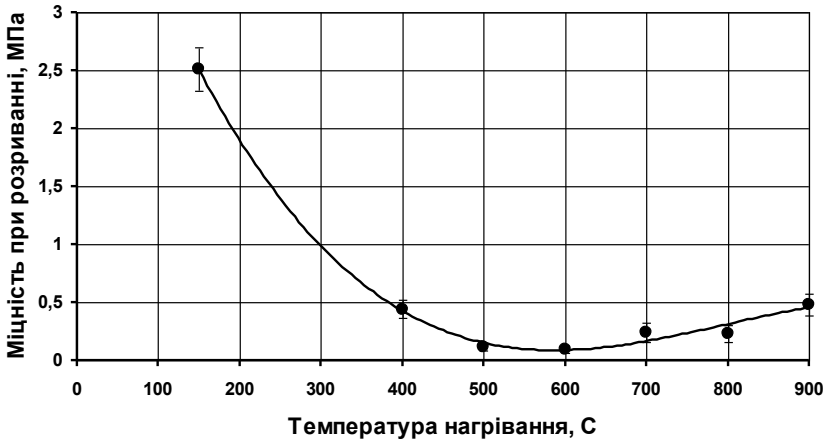


Рисунок 2 – Залежність міцності стрижневої суміші від температури нагрівання зразків

Аналіз залежності на рис. 2 дає змогу встановити, що мінімальну залишкову міцність стрижні мають в інтервалі температур 500…600 °С – вона приблизно в 20 разів менша за початкову міцність. При подальшому нагріванні зразків до 700…900 °С залишкова міцність досягає значення 0,5 МПа, що має значною мірою ускладнити вибивання стрижнів.

Для пояснення фізико-хімічних процесів, які призвели до такої зміни залишкової міцності, було проведено диференційний термогравіметричний аналіз. Для аналізу вибрано пробу виключно ЗК, без наповнювача, з метою чіткого встановлення його перетворень та температурних інтервалів. Нагрівання проведено в повітряному середовищі, швидкість 20…30 °С/хв. Графік наведено на рис. 3.

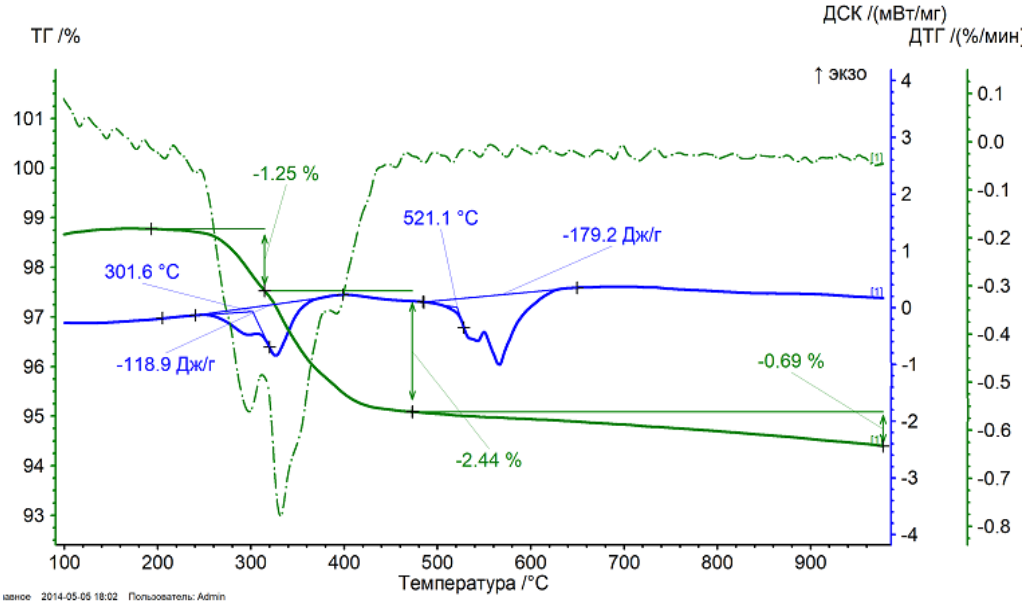


Рисунок 3 – Диференційний термогравіметричний аналіз зв’язувального компонента, утвореного із 5 мас. ч. $Na_5P_3O_{10}$ та 1 мас. ч. H_3PO_4

На кривій ДТА дослідної проби початок першого ендотермічного ефекту близький до 250 °С. Співставляючи отриманий результат із даними [10, 11] з'ясовуємо, що в інтервалі температур 220…250 °С має відбуватися перетворення гідрофосфатів натрію, яке у нашому випадку описується наступною схемою:

$$Na_2H_2P_2O_7 \xrightarrow{220..250^oC} 2NaPO_3 + H_2O \quad (1)$$

Втрата маси у вигляді H_2O за реакцією (1) має становити 8,1%. Враховуючи вміст пірофосфату натрію в пробі (41,8%), розрахункова втрата маси становить 3,4%, а за кривою термоаналізу (див. рис. 3) вона становить 3,7%, що майже співпадає з теоретичним результатом.

Для додаткового підтвердження описаних фізико-хімічних процесів було проведено рентгенофазовий аналіз цього ж самого ЗК після нагрівання до 400 °С, тобто в температурній області між двома ендотермічними ефектами на кривій ДТА. Дифрактограму наведено на рис. 4.

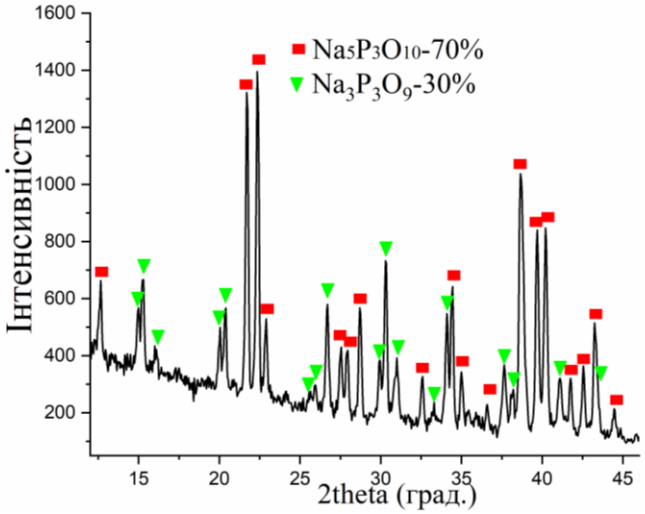


Рисунок 4 – Дифрактограма зв'язувального компонента, утвореного із 5 мас. ч. $Na_5P_3O_{10}$ та 1 мас. ч. H_3PO_4, після нагрівання до 400 °С

За результатами фазового аналізу виявлено, що продуктом реакції дійсно являється метафосфат натрію, але він має іншу форму. Отже, точна хімічна реакція, яка описує перше перетворення, виглядає так:

$$3Na_2H_2P_2O_7 \xrightarrow{220..250^oC} 2Na_3P_3O_9 + 3H_2O \quad (2)$$

Для аналізу другого ендотермічного ефекту проаналізовано дані авторів [10, 11], які установили схожий ендотермічний ефект на кривій термоаналізу триполіфосфату натрію при температурі 510…520 °С, який відповідає його поліморфному перетворенню. При проведенні досліджень нами виявлено аналогічний ефект при температурі 521,1 °С (див. рис. 3).

При подальшому нагріванні на кривій термоаналізу (див. рис. 3) спостерігається ще один ендотермічний ефект близько до 580 °С, який відповідає процесу плавлення метафосфату натрію.

Після плавлення та подальшого затвердіння метафосфат натрію набуває аморфної форми, про що свідчить дифрактограма, наведена на рис. 5.

Залишковий триполіфосфат натрію також після нагрівання переходить в аморфну форму, оскільки жодної кристалічної фази в пробі не виявлено. Оскільки процесу плавлення триполіфосфату не відмічено, аморфізація відбулася під час його поліморфного перетворення.

Зниження залишкової міцності в інтервалі температур до 500 °С пояснюється тим, що у складі ЗК пірофосфат натрію перетворюється на метафосфат. Внаслідок цього адгезійні зв'язки між ЗК та наповнювачем стають слабшими.

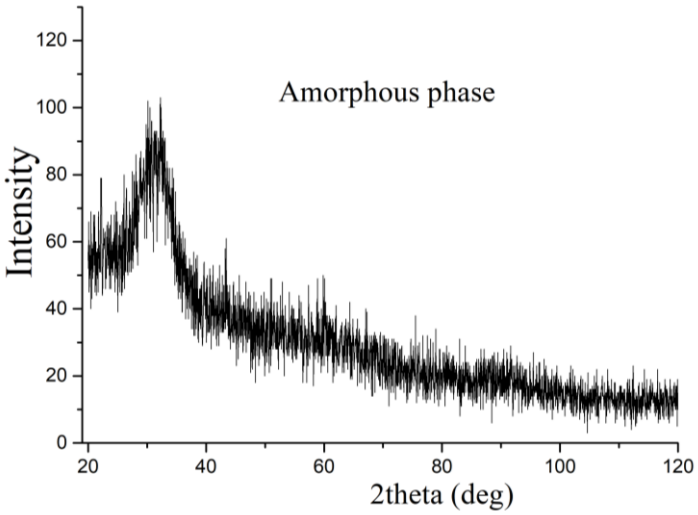


Рисунок 5 – Дифрактограма зв'язувального компонента, утвореного із 5 мас. ч. $Na_5P_3O_{10}$ та 1 мас. ч. H_3PO_4, після нагрівання до 700 °С

Відповідно зростання міцності при нагріванні вище температури 600 °С зумовлено плавленням метафосфату з подальшим спіканням суміші під час її охолодження. Додатково факт наявності в суміші рідкої незв'язаної фази підтверджує те, що під час експерименту зразки в нагрітому до 800…900 °С стані були абсолютно позбавлені маніпуляційної міцності і розсипалися. Після остаточного охолодження процес спікання завершився і зразки набули значної міцності.

Отже, ця суміш має відносно легшу вибиваємість за умови наскрізного прогрівання стрижнів не вище температури 600 °С. Такі умови відповідають сталевим або чавунним виливкам із середньою товщиною стінок. Однак значення залишкової міцності все одно не менші за 0,15…0,20 МПа при розриванні. Такі показники свідчать про важке видалення стрижнів із внутрішніх порожнин виливків.

Альтернативним способом вилучення стрижнів є витримка виливків у воді. Теоретичною передумовою для цього є водорозчинність фосфатів натрію. Було проведено дослідження на знеміцнення у воді всіх зразків по черзі. Спочатку визначали знеміцнення зразків, нагрітих до 400 °С, потім до 500 °С і т.д.

Зразки суміші, нагріті до температур 400 і 500 °С, повністю знеміцнились у холодній воді впродовж 1…2 хв. Після нагрівання до температур в межах 600…700 °С зразки розчиняються впродовж 5 хв. Зразки, нагріті до 800 °С знеміцнюються впродовж 10…15 хв, нагріті до 900 °С – за 30…40 хв.

Це означає, що для виливків із будь-яких сплавів, незважаючи на високу залишкову міцність цієї суміші, можна рекомендувати вилучення стрижнів водним способом.

За допомогою ливарних стрижнів, виготовлених із дослідженої суміші, виготовлено литі деталі із легованої жаростійкої сталі 30Х25Ю2ТЛ, які являють собою насадки пальників теплових агрегатів теплоелектростанцій. Виливки із стрижнями і без них показано на рис. 6.

а б в

Рисунок 6 – Насадки пальників теплових агрегатів, сталь 30Х25Ю2ТЛ, температура заливання 1580 °С: а – загальний вигляд виливка; б – виливок до вилучення стрижня; в – виливок після вилучення стрижня

Ливарні стрижні із цих виливків (внутрішній діаметр 22 мм, довжина 200 мм) повністю вилучено в холодній воді протягом 40…60 хв. Внутрішня поверхня не має пригару та інших дефектів. Таким чином, підтверджено можливість вилучення стрижнів із протяжних внутрішніх контурів у водному середовищі, без ударних навантажень. Такий варіант підходить не тільки для високолегованих сталей, які часто мають невисокий рівень механічних властивостей, а й для ковкого та сірого чавуну.

Актуальним питанням для неорганічних ЗК є можливість їх повторного або багаторазового використання. Це дає значні економічні переваги, а також, з огляду на екологічні недоліки, притаманні фосфатам натрію, доцільною є їх ізоляція в межах ливарних підприємств.

Експериментальну стрижневу суміш після витримки у воді перевірено на предмет повторного зміцнення. Наявність у складі оборотної суміші залишків зразків, які були нагріті до різних температур, наближає дослідження до реальних умов, у яких стрижні прогріваються нерівномірно. Результати визначення міцності зразків наведено на рис. 7.

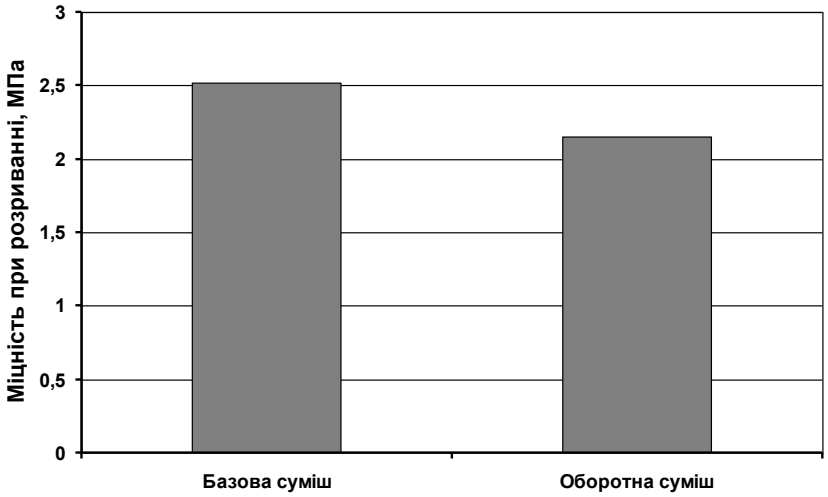


Рисунок 7 – Порівняльна діаграма міцності базової та оборотної сумішей

Із порівняльної діаграми на рис. 7 очевидним є унікальний результат: після повторного виготовлення зразків міцність суміші майже ідентична початковим показникам. Це означає, що наявні у складі ЗК фосфати натрію після високотемпературного нагрівання здатні зберігати свою зв'язувальну здатність. Це дає змогу повторно використовувати оборотну суміш після вилучення стрижнів водним способом. Це також сприяє економії ЗК, а додатково – його ізоляції у замкненому циклі виробництва без потрапляння у водні екосистеми. Для повторного виготовлення стрижнів добавка свіжого ЗК має бути мінімальною.

Висновки:

Досліджено залишкову міцність при розриванні стрижневої суміші із зв'язувальним компонентом, утвореним із триполіфосфату натрію та ортофосфорної кислоти, після нагрівання до різних температур в інтервалі від 400 до 900 °С. Визначено, що мінімальні значення залишкової міцності спостерігаються при 500…600 °С, при подальшому нагріванні міцність зростає через спікання частини зв'язувального компонента, яка являє собою метафосфат натрію.

Проведено дослідження щодо стійкості стрижневої суміші після високотемпературного нагрівання проти руйнівної дії води. В результаті встановлено, що суміш, яка була попередньо нагріта до 400…500 °С, повністю знеміцнились у холодній воді впродовж 1…2 хв. Суміш після нагрівання до температур в межах 600…700 °С втрачає міцність впродовж 5 хв, після нагрівання до 800 °С – впродовж 10…15 хв, після нагрівання до 900 °С – за 30…40 хв. Вилучення ливарних стрижнів діаметром 22 мм і довжиною 200 мм із внутрішніх порожнин сталевих виливків здійснено за 40…60 хв.

Здійснено порівняльний аналіз міцності стрижневої суміші із свіжим зв'язувальним компонентом та оборотної суміші після прожарювання та розчинення у воді. Уставлено що суміш здатна до повторного затвердіння із високим (понад 2,0 МПа) показником міцності. Таким чином підтверджено принципову можливість повторного використання фосфатів натрію в складі стрижневих сумішей.

Бібліографічний опис:

1. Liutyi R., Tyshkovets M., Liuta D., Sheiko O. Physical and chemical fundamentals of sodium phosphate use in foundry production // Physics and chemistry of solid state. - 2020. - V. 21, N4. - P. 756-763.
2. Liutyi R., Petryk I., Tyshkovets M., Myslyvchenko O., Liuta D., Fyodorov M. Investigating sodium phosphate binders for foundry production // Advances in Industrial and Manufacturing Engineering, 2022. – https://doi.org/10.1016/j.aime.2022.100082
3. S.I. Berul', N.K. Voskresenskaya // J. Sci. Chem. – 1965 – v. 10, No. 5– pp. 1110-1120.
4. P.N. Fedorov, M.V. Mekhoseev, V.N. Krivenko// J. Sci. Chem. – 1962.– v. 7, No. 1 – pp. 76-80.
5. N.M. Smirnova, N.I. Silant'eva, R.G. Lepilina et al. // Research in the production of phosphorus and its compounds. – 1977. – No. 27.– pp. 74-79.
6. Ponomarenko, O., Berlizeva, T., Grimzin, I., Yevtushenko, N., Lysenko, T. (2020). Strength Properties Control of Mixtures Based on Soluble Glass with Ethereos Solidifiers. In: Ivanov, V., Trojanowska, J., Pavlenko, I., Zajac, J., Peraković, D. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_50.
7. Химический энциклопедический словарь / Редкол.: Кнунянц И.Л. и др. – москва: Советская энциклопедия, 1983. – 792 с.
8. Крижановський Є.М. Дослідження тенденцій використання фосфатних миючих засобів [Електронний ресурс] / [Крижановський Є.М., Гурко О.В., Жак А.В.] // Збірник наукових статей "III-го Всеукраїнського з'їзду екологів з міжнародною участю". – Вінниця, 2011. – Том.1. – С.216–219.
9. Почапський В. Є. Дослідження впливу фосфатів синтетичних миючих засобів на процеси евтрофікації / В. Є. Почапський, С. О. Осипенко // Міжнародна науково-практична конференція «Екологічні проблеми навколишнього середовища та раціонального природокористування в контексті сталого розвитку». – Полтава, 2019, – С. 90–94.
10. Домбровский Н.М. Термографическое исследование динатрийфосфата / Н. М. Домбровский // Журнал научной химии. – 1960. – №8. – С. 1699-1710.
11. Лидин Р. А. Химические свойства неорганических веществ: Учеб. пособие для вузов. – 3-е изд., испр. / Р. А. Лидин. – москва: Химия, 2000. – 480 с.

УДК 662.749.2

Малий Е.І., Чемеринський М.С.

Дослідження особливостей модифікації електродного пеку фенолформальдегідною смолою

Malyi E.I., Chemerinskiy M.S.

Research of features modification for electrode pitch by phenol-formaldehyde resin

Мета. Дослідження фізико-хімічних процесів, що проходять між розплавленим пеком і модифікатором – фенол-формальдегідної смоли, та запропоновані фактори регулювання процесу модифікації.
Методика. Дослідження модифікації електродного пеку фенол-формальдегідною смолою проводили з використанням методів математичного моделювання, визначення групового складу, сорбційної ємності термоантрациту, зміни крайового кута та індексу змочування.
Результати. Визначено, що фенол-формальдегідна смола здатна впливати на реологічні характеристики електродного зв'язуючого.
Наукова новизна. Вперше показано, що при технологічному формуванні групового складу пеку під впливом фенол-формальдегідної смоли відбувається його пластифікація, а найбільш дієвим фактором регулювання процесу модифікації є термічна витримка та вміст модифікатору.
Практична значущість. За результатами роботи встановлено, що модифікація електродного пеку фенол-формальдегідною смолою позитивно впливає на його властивості, а отримані параметри процесу можливо використовувати під час виробництва вуглеграфітових виробів.
Ключові слова: електродний пек, фенол-формальдегідна смола, модифікація, груповий склад, реологія.
Goal. Research of the physicochemical processes that take place between the molten pitch and the modifier - phenol-formaldehyde resin, and proposed factors for the regulation of the modification process.
Method. The study of modification of electrode pitch with phenol-formaldehyde resin was carried out using methods of mathematical modeling, determination of group composition, sorption capacity of thermal anthracite, change of edge angle and wetting index.
The results. It was determined that phenol-formaldehyde resin can affect the rheological characteristics of the electrode binder.
Scientific novelty. For the first time, it was shown that during the technological formation of the group composition of pitch under the influence of phenol-formaldehyde resin, its plasticization occurs, and the most effective factor in regul-?ting the modification process is thermal exposure and the content of the modifier.
Practical significance. According to the results of the work, it was established that the modification of electrode pitch with phenol-formaldehyde resin has a qualitative effect on its properties, and the obtained process parameters can be used during the production of graphitized products.
Key words: electrode pitch, phenol-formaldehyde resin, modification, group composition, rheology.

Вступ. Механізм модифікації пеку, відповідно до позиції сучасних теоретичних уявлень, слід розглядати, виходячи з характеру розподілу модифікатора в полідисперсному середовищі розплавленого пеку, а також у процесі формування нових типів структури. Якщо процес модифікації відбувається на молекулярному рівні, відбувається внутрішньокластерна модифікація, а у разі розподілу добавки у надмолекулярних структурах – міжкластерна [1].

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Фракційний склад пеків протягом кількох років є предметом гострих дискусій.

Існує багато питань про α_1-фракцію [2,3]. Фракція, нерозчинна в хіноліні, що складається з найбільш високомолекулярних ароматичних вуглеводнів, має впорядковану структуру.

За походженням α_1-фракція може бути розділена на первинну парогазову фазу, що утворилася в коксовій камері, і вторинну, яка сформувалася в рідинній фазі при переробці смоли і отриманні зв'язуючого. Речовини, що входять до складу первинної фракції, не мають можливості спікатися, але в технології виробництва вуглецевих мас носять позитивний характер, збільшуючи вихід коксу та покращуючи характеристики міцності готових виробів.

Граничне значення вмісту α_1-фракції у зв'язуючих речовинах визначається переважно видом вуглеграфітових виробів, для яких вони призначені. Так, наприклад, для самовипалювальних електродів допустима межа масової частки α_1-фракції знаходиться на рівні 13,5%, а для обпалених анодів вона не повинна перевищувати більше 10% [3].

Вуглецеві маси, які використовують для одержання електродів, анодів, ніпелів та іншої електродної продукції, є сумішами твердих вуглецевих наповнювачів із зв'язуючим матеріалом – пеком. Вважається [4], що природа та фізико-хімічні характеристики початкової сировини визначають роль при формуванні вуглецевої структури та експлуатаційних властивостей готової продукції. Це пов'язано, насамперед [4,5], з високомолекулярними компонентами пеку (β- та α_2-фракції), які характеризують більш інтенсивною адсорбційною взаємодією з поверхневим шаром обпалених вуглецевих матеріалів, ніж низькомолекулярні сполуки, що

Малий Е.І.,	
Чемеринський М.С.	

входять до складу γ-фракції.

Проте фізико-хімічний стан адгезійного шва зв'язуючого матеріалу, який формується на стадії змішування вуглецевої композиції, тісно пов'язаний з фізико-механічними показниками маси на стадіях пресування, прожарення та графітації. Тому, для зв'язуючого пеку дуже важливими є поєднання оптимальної в'язкості, спікання та коксоутворення. Таким чином, γ-фракція забезпечує хороше змочування зерен вуглецевого наповнювача, проте властивостей спікання не виявляє. Для різного пеку вихід коксу з фракції становить від 4% до 14 % [5].

Речовини β-фракції є найважливішими при формуванні зв'язуючих і спікаючих властивостей пеків. Вона сприяє високим адгезійним властивостям, тому збільшення вмісту у пеку β-фракції обумовлює поліпшенню якості електродних виробів [6].

У свою чергу, α-фракція сприяє хорошим пластифікуючим властивостям, що забезпечують високу спікливу здатність і при карбонізації дає високий вихід коксового залишку, але при цьому вміст не повинен перевищувати інтервал 25-31%.

Адже для покращення властивостей зв'язуючого електродного пеку необхідно використовувати такі модифікатори, які не впливають на якісні характеристики експлуатаційних властивостей вуглеграфітових виробів.

В якості добавок до зв'язуючих електродних пеків автори робіт [7] пропонують використовувати: олігомери стиролу, полістиролу, тринітрофенолу, тринітротолуолу, оксалат заліза, гідрохінон, сірку, бор, хлорид алюмінію, антраценову фракцію кам'яновугільної смоли.

Прагнення до поліпшення змочувальної та спікливої здатності зв'язуючого матеріалу, по відношенню до твердих наповнювачів, зумовило використання великої кількості пластифікуючих добавок органічного походження [8].

Як правило, ефект пластифікації пов'язаний із здатністю відносно низькомолекулярних речовин змінювати внутрішню енергію пекової системи, впливаючи при цьому на межі розділу фаз. У якості пластифікаторів випробувані органічні речовини наступного ароматичного складу: кисла смолка бензольного відділення, нафталін, мита фенольна фракція, пекові дистиляти [9,10].

Практична цінність модифікації відображена в роботі [11], яка присвячена питанням деструкції та коксоутворення електродного пеку. Було розглянуто процеси, які мають місце при карбонізації, як ланцюг паралельно-послідовних реакцій. Сутність цих процесів полягає у протіканні реакцій деструкції, що, у свою чергу, обумовлює зміну мезофазних утворень та синтезу, на цій основі, нових сполук.

У роботі [12] авторами розглянуто органічні речовини з молекулами ароматичних сполук, які у порівнянні з іншими органічними сполуками здатні до утворення центрів кристалізації – глобул. До таких речовин автори відносять і феноли.

Феноли у чистому вигляді це полярні сполуки, що складаються з бензольного кільця, яке містить реакційно-активну ОН-групу [13].

Матеріали та методи дослідження. Для визначення позитивного впливу фенолу як модифікатор була використана фенол-формальдегідна смола. Досліджуваний зразок електродного пеку марки – В був відібраний на ПрАТ «Дніпровський коксохімічний завод». Пек з температурою розм'якшення 80 °С модифікували: дослідна проба в кількості 1 кг. нагрівалася до температури 140 °С, далі вводилася фенол-формальдегідна смола в кількості 1-3% від сухої маси пеку. Кожна отримана проба ретельно перемішувалась, час перемішування t=0,5-2,0 годин і охолоджувалась до температури навколишнього середовища. Середньозважена проба пеку перед дослідженнями усереднювалася за складом.

Також проведено - оптимальний вибір кількості добавки та визначено вплив температурно-годинного фактору на термохімічні перетворення електродного пеку.

Результати дослідження. Для моделювання ефекту модифікації прийнято варіювання наступних факторів: години перемішування t=0,5-2,0 год.; вміст фенол-формальдегідної смоли Р=1; 2; 3%.

Як відгук використовували відношення змін групового складу модифікацій пеку щодо α-, β-, γ-фракцій:

$$\Delta\alpha = \alpha - \frac{\alpha_0 + P}{100 + P} \times 100 \quad (1)$$

$$\Delta\beta = \beta - \frac{\beta_0}{100 + P} \times 100 \quad (2)$$

$$\Delta\gamma = \gamma - \frac{\gamma_0}{100 + P} \times 100 \quad (3)$$

де α_0, β_0, γ_0 – вміст відповідних фракцій у базовому пеку,%;

α, β, γ – вміст відповідних фракцій у модифікаціях пеку,%;

P – кількість модифікатора від сухої середньозваженої маси пеку,%.

Результати експерименту наведено у таблицях 1 та 2.

Таблиця 1
Груповий склад пеків, модифікованих фенол-формальдегідною смолою при постійній температурі 140°С

Фенол-формальдегідна смола, % від маси пеку	Години т, год	Вміст фракцій, %		
		α	β	γ
1	0,5	34,6	33,6	31,8
1	1,0	35,6	34,3	30,1
1	1,5	34,0	34,5	29,9
1	2,0	34,9	34,6	29,7
2	0,5	36,4	37,0	26,6
2	1,0	36,7	37,3	26,0
2	1,5	36,5	39,6	23,9
2	2,0	36,8	39,7	23,5
3	0,5	35,1	34,8	30,1
3	1,0	36,1	34,8	29,1
3	1,5	36,7	40,3	23,0
3	2,0	36,9	40,4	22,5

Таблиця 2
Відносні зміни фракцій пеку при модифікації фенол-формальдегідною смолою при постійної температурі 140°С

Фенол-формальдегідна смола, % від маси пеку	Години т, год	Відносний вміст фракцій, %		
		Δα	Δβ	Δγ
1	0,5	-1,5	+4,0	-3,2
1	1,0	-0,5	+3,9	-4,0
1	1,5	+0,4	+3,8	-4,2
1	2,0	+1,4	+3,7	-5,1
2	0,5	-1,5	+2,6	-1,5
2	1,0	-0,7	+3,0	-2,5
2	1,5	-0,2	+3,5	-3,5
2	2,0	+0,4	+4,0	-4,4
3	0,5	-1,4	+1,2	+0,2
3	1,0	-1,2	+2,2	-1,0
3	1,5	-0,8	+3,2	-2,2
3	2,0	-0,6	+4,2	-3,7

Також наведено рівняння регресії у натуральному вигляді (4-6), за якими побудовані кінетичні криві зміни групового складу у процесі модифікації електродного пеку (рис. 1-3).

$$\Delta\alpha=14,2–6,62\cdot\tau–0,1\cdot t–4,06\cdot P+0,0456\cdot\tau\cdot t+0,26\cdot\tau\cdot P+0,0246\cdot t\cdot P \quad (4)$$

$$\Delta\beta=–17,3+11,4\cdot\tau+0,107\cdot t–0,34\cdot P+0,0733\cdot\tau\cdot t+0,32\cdot\tau\cdot P+0,0083\cdot t\cdot P \quad (5)$$

$$\Delta\gamma=10,4–6,85\cdot\tau–0,062\cdot t+3,64\cdot P+0,0456\cdot\tau\cdot t–0,71\cdot\tau\cdot P–0,0263\cdot t\cdot P \quad (6)$$

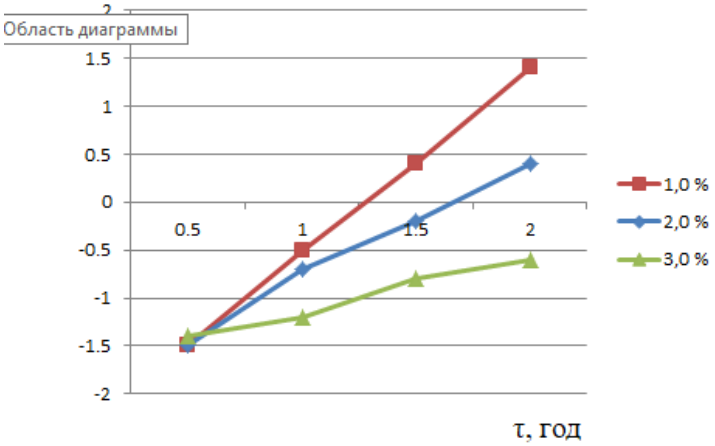


Рисунок 1. Зміна α–фракції пеку при постійній температурі 140°С у процесі модифікації фенол-формальдегідною смолою (% від маси пеку)

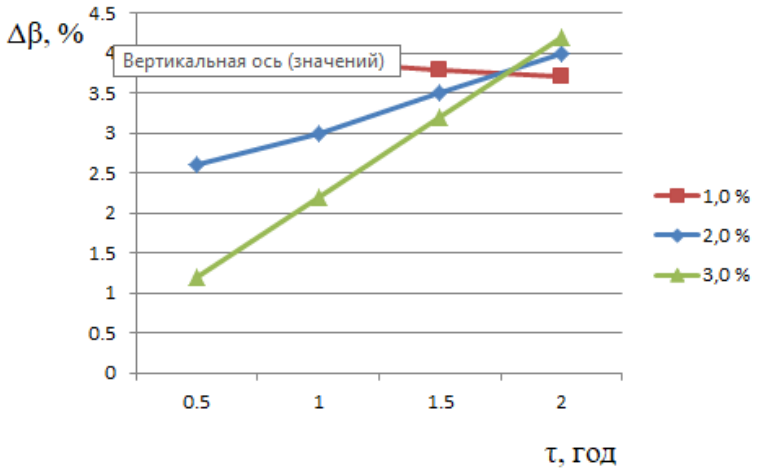


Рисунок 2. Зміна β–фракції пеку при постійній температурі 140°С у процесі модифікації фенол-формальдегідною смолою (% від маси пеку)

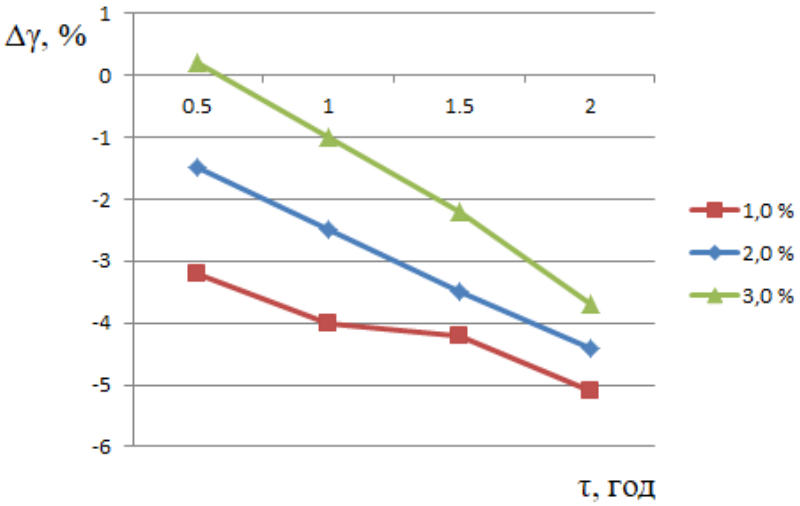


Рисунок 3. Зміна γ–фракції пеку при постійній температурі 140°С у процесі модифікації фенол-формальдегідною смолою (% від маси пеку)

Результати моделювання дозволили визначити оптимальну кількість добавки *P*=3,0% та час τ≈2 год., і вони покладені в основу подальших експериментальних досліджень.

Пек аналізували щодо його поведінки на межі розділу фаз «наповнювач-

зв'язуюче» включаючи такі показники: сорбційна ємність, крайовий кут змочування та індекс змочування.

Сорбційна ємність наповнювача, термоантрациту, по відношенню до зв'язуючого, характеризує здатність модифікатора частково пластифікувати пек і за рахунок цього процесу підвищувати здатність зв'язуючого змочувати твердий вуглецевий матеріал. Показник визначали за стандартною методикою А.Ф. Красюкова [14]. Результати досліджень зведено до таблиці 3.

Таблиця 3

Сорбційна ємність термоантрациту по відношенню до розчину електродного пеку та його модифікацій у бензолі

Розчин пек-бензол			
Базовий	Термоантрацит – пек (фенол-формальдегідна смола 1,0%)	Термоантрацит – пек (фенол-формальдегідна смола 2,0%)	Термоантрацит – пек (фенол-формальдегідна смола 3,0%)
0,279	0,405	0,505	0,558

Модифікуючий ефект при обробці пеку досягається максимальної величини сорбційної ємності 0,558 при внесенні 1,5% модифікатора.

Обговорення результатів. Згідно з теорією спікання гетерогенних вуглецевих композицій, однією з первинних характеристик формування вуглеграфітових виробів є реологічна характеристика

зв'язуючої речовини. Виходячи з величин реології, можна судити про максимальну сорбцію наповнювачів до пеку, яка формує прикордонні шари системи «наповнювач- зв'язуюче», де з максимальною швидкістю утворюватиметься вуглецева зв'язка у вигляді коксу. Можливо, що фенол-формальдегідна смола здатна впливати на реологічні властивості пеку, тим самим змінюючи крайовий кут і індекс змочування.

Крайовий кут змочування визначає енергію поверхневого розподілу фаз, а також енергію адгезії. Якщо θ=0°, то відбувається повне змочування, якщо θ>90°, тоді змочування утруднене, при θ=180° змочування відсутнє [15].

Практичне значення цієї величини таке: для оцінки ефективності зв'язуючої речовини кут менший θ, одержаний в умовах зменшеної поверхні контакту, більш важливий, тому що для склеювання, необхідне дотримання вимог максимального злипання розплавленого зв'язуючого – пеку до наповнювача після затвердіння, оскільки саме цей фактор визначає змочування, адгезію та склеювання зерен наповнювача.

Оцінюючи крайовий кут змочування (θ) необхідно пам'ятати, що він не залежить від розмірів краплі розплавленого зв'язуючого, а залежить від молекулярної природи поверхні розділу фаз у системі «наповнювач- зв'язуюче». Метод ґрунтується на визначенні «лежачої краплі» зв'язуючого до поверхні термоантрациту [16]. Отримані результати були опрацьовані статистичним аналізом (рис. 4).

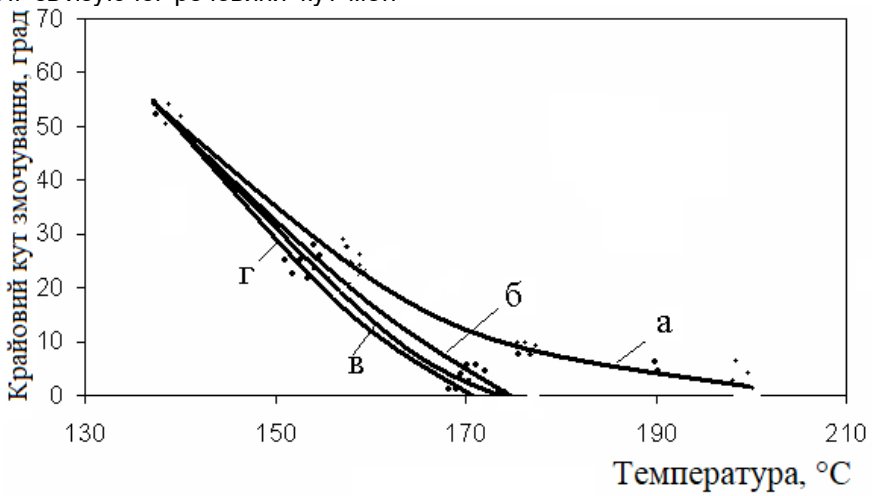


Рисунок 4. Крайові кути змочування до термоантрациту базового пеку а) та його модифікацій (% фенол-формальдегідною смолою): б) 1% в) 2 г) 3.

Визначення індексу змочування проводили при температурах 140, 160 і 200 °С. Випробування проводили за методом [17]. Отриманні дані наведені на рисунку 5.

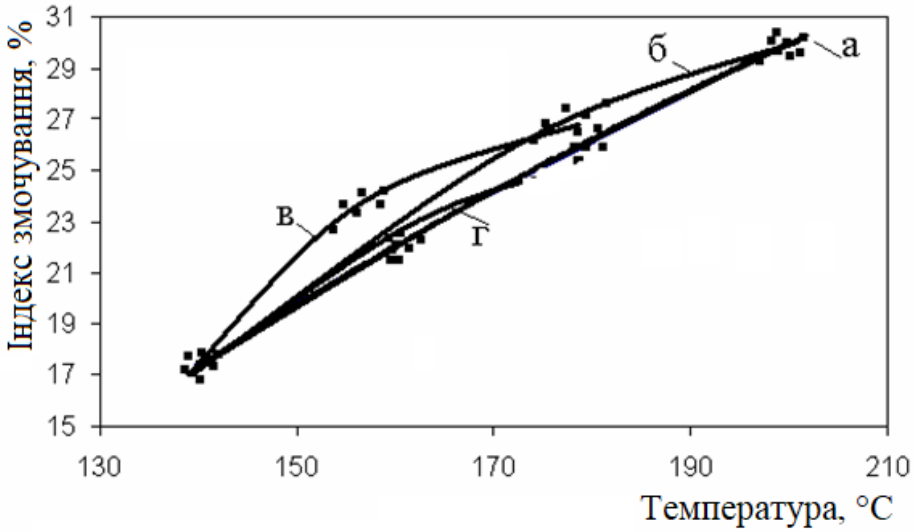
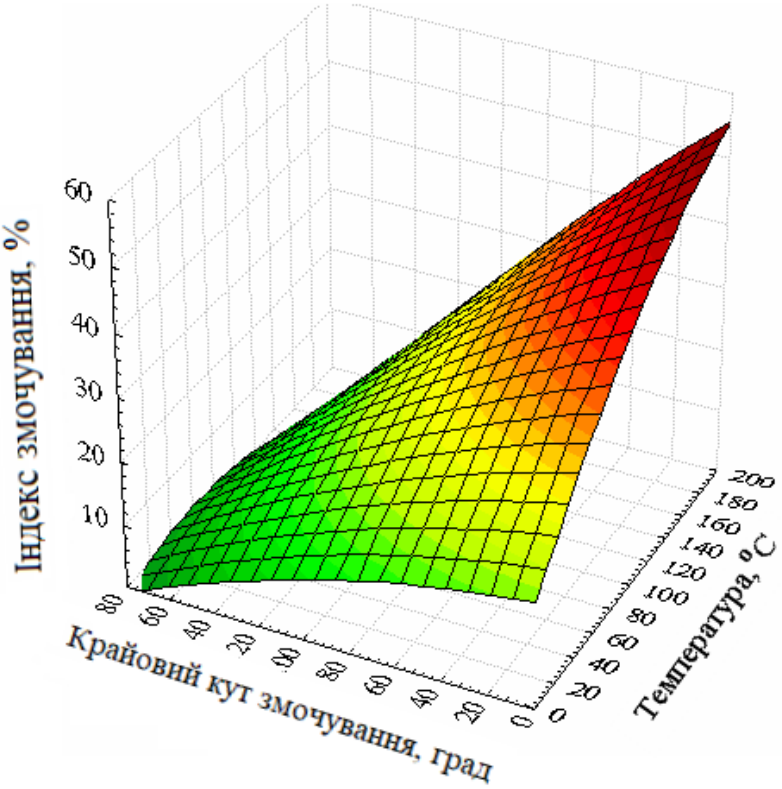


Рисунок 5. Індекс змочування термоантрациту базовим пеком (а) та його модифікацій (% фенол-формальдегідною смолою): б) 1% в) 2 г) 3.

Динаміка графіків характеризує, що фенол-формальдегідна смола здатна впливати на реологічні характеристики електродного зв'язуючого, змінюючи при цьому сорбційну здатність наповнювачів. Подібне явище зумовлює зростання ступеня адсорбції пеку щодо поверхні термоантрациту, та

визначає подальшу перспективу отримання більш щільного вуглеграфітового виробу. Регресійний метод з оптимізацією розсіювання та апроксимацією підтверджує можливість встановлення взаємного впливу вищезазначених двох показників одночасно на поверхню твердого вуглецевого наповнювача – термоантрациту (рис.6).



$Z=16,6982+0,3116\times x-0,0345\times y-0,0006\times x^2-0,0013\times x\times y-0,0004\times y^2$

Рисунок 5. Взаємний вплив показників пеку, щодо поверхні термоантрациту у температурному інтервалі 0-200 °С

Аналізуючи коефіцієнти при парних взаємодіях факторів типу х·у можна констатувати, що ефект кожного з них залежить від того, на якому рівні знаходиться інший взаємодіючий фактор. У загальному випадку наявність взаємодії двох факторів посилює позитивний ефект одного з них. Таким чином, рівняння показує ступінь впливу обраних факторів та їх взаємодії на якість зв'язуючого пеку.

Отже, коефіцієнти регресії дають уявлення про те, наскільки зміниться значення відгуку, якщо фактори змінити на величину одного інтервалу варіювання.

Висновки. В електрометалургійному виробництві самовипалювальні електроди повинні витримувати дуже високі струмові навантаження, тому щільність електрода є дуже важливою характеристикою. Оскільки текстура електрода не повинна мати порожнечі, тріщини та поруватість, тому що високе струмове навантаження може призвести до обриву робочого кінця електрода у ванну електродугової печі.

При технологічному формуванні групового складу пеку під впливом фенол-формальдегідної смоли відбувається його пластифікація, найбільш дієвим фактором регулювання процесу модифікації є термічна витримка близько 2 годин при додаванні 3,0% модифікатору від середньозваженої сухої маси пеку.

Проведений комплекс теоретичних та практичних експериментів обумовлює перспективу використання фенолу (фенол-формальдегідної смоли) як пластифікатору електродного пеку та дає можливість подальших досліджень у цьому напрямку.

Бібліографічний опис

1. Привалов В.Е., Степаненко М.А./ Каменноугольный пек – М.: Металлургия 1981. – 208 с.

2. Чистяков А.Н. Денисенко В.И Химический состав каменноугольных пеков // Химия твердого топлива. – 1982. – № 5. – С. 82-87.

3. Мариич Л.И., Жаботинская С.М Исследование состава и структуры каменноугольного пека методом газовой хроматографии // Кокс и химия. – 1986.– № 10. – С. 33-38.

4. Питюлин И.Н. Научно-технологические основы создания каменноугольных углеродсодержащих материалов для крупногабаритных электродов// Харьков 2004. – 480с.

5. Санников А.К. Исследование в области переработки каменноугольного пека как связующего при производстве углеграфитовых материалов: Автореф. дис. канд. тех. наук. – Свердловск. 1970. – 29с.

6. Селиверстов М.Н., Лапина Н.А К оценки структурных параметров каменноугольного пека //Химия твердого топлива. –1989. – №2. –С. 25-28.

7. Федосеев С.Д., Андросенко Л.Ф., Рабизов В.А. Обработка каменноугольного пека с целью снижения фракций нерастворимых в хинолине// Перспективы использования угля и продуктов его переработки в народном хозяйстве: Тез. докл. I Респ. конф, – Донецк. 1985. – С. 16-17.

8. Мочалов В.В Попов В.К, Русьянова Н.Д и др. О пластификации каменноугольных электродных пеков // Кокс и химия. 1985. – № 10. – С. 35-40.

9. Старовойт А.Г., Малый Е.И. Оптимизация свойств каменноугольных пеков для електродного производства // Кокс и химия. – 2007. – № 10. – С. 39-43.

10. Лапина Н. А., Стариченко Н.С., Бейлина Н. Ю., Островський В.С. Влияние некоторых органических соединений на технологические характеристики пека как связующего// VI Всесоюз. научно-техн. конф. электродной промышленности: тезисы докл. Челябинск: Южно-Уральское изд-во, 1988. – Вып. 6. – С. 20-21.

11. Лапина Н. А., Стариченко Н.С., Бейлина Н. Ю., Островський В.С. Изменение адгезионных свойств пеков под воздействием органических соединений //ХТТ – 1988. – №5. – С. 116-121.

12. Бейлина Н. Ю., Островский Д. В., Островский В. С. Модификация пеков // ХТТ – 2002. – №6. – С. 62-73.

13. Хигаси К. Квантовая органическая химия / К.Хигаси, Х.Баба, А.Рембаум. – М.: Мир, 1967. – 400 с.

14. Красюков А.Ф. Нефтяной кокс. – М.: Химия, 1966. – 264с.

15. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика дисперсных структур. В сб."Физико-химическая механика дисперсных структур".М.:Наука.1966. –С.5-16

16. Елишевич В. Т. Брикетирование угля со связующим – М.: Недра 1972. – 216с.

17. Старовойт А.Г., Гриншпунт А.Г., Малый Е.И., Уразлина О.Ю. Об оценки способности каменноугольного пека смачивать твердый углеродистый наполнитель // Кокс и химия. 2004. – №6 . – С. 15-17.

References

1. Privalov V.Ye., Stepanenko M.A./ Kamennougol'nyy pek – M.: Metal-lurgiya 1981. – 208 s.

2. Chistyakov A.N. Denisenko V.I Khimicheskiy sostav kamennougol'nykh pekov // Khimiya tverdogo topliva. – 1982. – № 5. – S. 82-87.

3. Mariich L.I., Zhabotinskaya S.M Issledovaniye sostava i struktury kamennougol'nogo peka metodom gazovoy khromatografii // Koks i khimiya. – 1986.– № 10. – S. 33-38.

4. Pityulin I.N. Nauchno-tekhnologicheskiye osnovy sozdaniya kamen-nougol'nykh uglerodsoderzhashchikh materialov dlya krupnogabaritnykh elektrodov// Khar'kov 2004. – 480s.

5. Sannikov A.K. Issledovaniye v oblasti pererabotki kamennougol'nogo peka kak svyazuyushchego pri proizvodstve uglegrafitovykh mate¬rialov: Atoref. dis. kand. tekh. nauk. – Sverdlovsk. 1970. – 29s.

6. Seliverstov M.N., Lapina N.AK otsenki strukturnykh parametrov kamennougol'nogo peka //Khimiya tverdogo topliva. –1989. – №2. –S. 25-28.

7. Fedoseyev S.D., Androsenko L.F., Rabizov V.A. Obrabotka kamenno-ugol'nogo peka s tsel'yu snizheniya fraktsiy ?-erastvorimykh v khinoline// Perspektivy ispol'zovaniya uglya i produktov yego pererabotki v narodnom khozyaystve: Tez. dokl. I Resp. konf, – Donetsk. 1985. – S. 16-17.

8. Mochalov V.V Popov V.K, Rus'yanova N.D i dr. O plastifikatsii kamennougol'nykh elektrodnykh pekov // Koks i khimiya. 1985. – № 10. – S. 35-40.

9. Starovoyt A.G., Malyy Ye.I. Optimizatsiya svoystv kamennougol'nykh pekov dlya yelektrodnogo proizvodstva // Koks i khimiya. – 2007. – № 10. – S. 39-43.

10. Lapina N. A., Starichenko N.S., Beylina N. YU., Ostrovs'kiy V.S. Vliyaniye nekotorykh organicheskikh soyedineniy na tekhnologicheskiye kharakteristiki peka kak svyazuyushchego// VI Vsesoyuz. nauchno-tekhn. konf. elektrodnoy promyshlennosti: tezisy dokl. Chelyabinsk: Yuzhno-Ural'skoye izd-vo, 1988. – Vyp. 6. – S. 20-21.

11. Lapina N. A., Starichenko N.S., Beylina N. YU., Ostrovs'kiy V.S. Izmeneniye adgezionnykh svoystv pekov pod vozdeystviyem organicheskikh soyedineniy //KHTT – 1988. – №5. – S. 116-121.

12. Beylina N. YU., Ostrovskiy D. V., Ostrovskiy V. S. Modifikatsiya pekov // KHTT – 2002. – №6. – S. 62-73.

13. Khigasi K. Kvantovaya organicheskaya khimiya / K.Khigasi, KH.Baba, A.Rembaum. – M.: Mir, 1967. – 400 s.

14. Krasyukov A.F. Neftyanoy koks. – M.: Khimiya, 1966. – 264s.

15. Rebinder P.A. Fiziko-khimicheskaya mekhanika dispersnykh struktur. V sb."Fiziko-khimicheskaya mekhanika dispersnykh struktur".M.:Nauka.1966. –S.5-16

16. Yelishevich V. T. Briketirovaniye uglya so svyazuyushchim – M.: Nedra 1972. – 216 s.

17. Starovoyt A.G., Grinshpunt A.G., Malyy Ye.I., Urazlina O.YU. Ob otsenki sposobnosti kamennougol'nogo peka smachivat' tverdyy uglerodistyy napolnitel'// Koks i khimiya. 2004. – №6 . – S. 15-17.

УДК 621.771.004.15(043)

Білодіденко С. В., Гануш В. І., Іжевський Є. А., Кострица С. А.

Формування режиму навантаження для прогнозування ресурсу колон гідравлічних пресів для виробництва залізничних коліс

Belodedenko S., Hanush V., Izhevskyi Y., Kostritsa S.

Formation of the loading for predicting the lifetime of the hydraulic presses columns for the railway wheels production

Дослідження в області міцності і надійності станин важких гідравлічних пресів особливої актуальності набули у зв'язку з необхідністю продовження ресурсу після їхньої довготривалої експлуатації. Найбільш небезпечним за наслідками відмови елементом станини є колони, які в свою чергу мають різьбове з'єднання як найбільш вразливе місце. Робота присвячена аналізу і узагальненню експериментальних досліджень пресу зусиллям 100 МН, формування режиму навантаження елементів колон для подальшої оцінки її технічного стану і прогнозування ресурсу. Розглянуто загальні принципи проєктування колон і особливості експлуатації дослідженої колесопрокатної лінії. За результатами експериментального вимірювання навантаженності станини пресу зусиллям 100 МН при виробництві залізничних коліс з'ясовано, що процес штампування однієї заготовки визиває один пульсуючий цикл зміни напружень в елементах станини. Середнє зусилля при пресуванні коліс діаметром 957 мм складає 70.3 МН, а для коліс діаметром 1062 мм прийнято зусилля 91.4 МН. Сформовано типовий режим навантаження елементів колони преса у вигляді блока з 4-х рівнів. Визначені еквівалентні зусилля блоків в залежності від умов прогнозування ресурсу. Досліджено вплив виробництва коліс великого діаметру на ресурс станин.

Ключові слова: *Гідравлічний прес, колона, ресурс, навантаження.*

The research in the area of strength and reliability of the frames of heavy hydraulic presses has become particularly relevant in connection with the necessity to extend the resource after their long-term operation. The most dangerous element of the frame due to the consequences of failure are the columns, which in turn have a threaded connection as the most vulnerable place. The work is devoted to the analysis and generalization of experimental studies of the press with a force of 100 MN, the formation of the load mode of the column elements for further assessment of its technical condition and resource forecasting. The general principles of column design and the features of operation of the investigated wheel rolling line are considered. According to the results of the experimental measurement of the load of the press stand with a force of 100 MN during the production of railway wheels, it was found that the process of stamping one workpiece causes one pulsating cycle of stress changes in the stand elements. The average force when pressing wheels with a diameter of 957 mm is 70.3 MN, and for wheels with a diameter of 1062 mm, the force is 91.4 MN. A typical load mode of press column elements in the form of a block of 4 levels has been formed. The equivalent efforts of the blocks are determined depending on the resource forecasting conditions. The influence of the production of large-diameter wheels on the resource of the stand frames has been studied.

Key words: *Hydraulic press, column, resource, load.*

Вступ. Інформація про навантаженість елементів механічних систем відіграє вирішальну роль при проєктуванні надійної конструкції, а також при визначені її ресурсних показників на стадії експлуатації. В загальному випадку навантаженість деталі моделюється частотним розподілом у вигляді спектра навантажень, характеристиками якого є міра повноти, коефіцієнт нерегулярності і число позитивних максимумів. Навантаження багатьох механічних систем, особливо, технологічних установок, значною мірою детерміновано і його недоцільно повністю представляти у вигляді випадкового процесу. У цьому випадку схематизацію процесу проводять на основі встановленої послідовності подій, утворюючи блок відповідної форми. Тривалість події та рівень навантаження такого формалізованого блоку можуть змінюватись. Базові дані опору втомі для прогнозування ресурсу в таких умовах отримують при навантаженні формалізованими блоками з параметрами, що варіюються. Здійснюється перехід від суто випадкових процесів, які не характерні для технологічних машин до схематизованих процесів з випадково змінюваними параметрами.

Колесопрокатна лінія, якій присвячено даний матеріал, була запущена на початку 70-х років 20 сторіччя. В своєму складі вона налічує 4 важкі гідравлічні преси зусиллям від 25 до 100 МН. Після 30-річної доволі інтенсивної експлуатації на підприємстві поступово стали замінювати елементи базових конструкцій пресів. В першу чергу, це стосувалося колон пресів і різьбових стяжок (шпильок), які тримають в складеному стані верхній архітрав. В них різьбове з'єднання здійснюється за допомогою термозатягування, і дуже важливо забезпечити рівність зусиль затягання в груповому з'єднанні. В станинах пресів з'являються тріщини, які заварюються по певних технологіях. Всі ці ремонтні заходи потребують наукового супроводження, який менеджмент підприємства разом з профільними установами здійснює з 2008 року. Метою цієї роботи був аналіз і узагальнення про-

Білодіденко С. В.,	
Гануш В. І.,	
Іжевський Є. А.,	
Кострица С. А.	

ведених експериментальних досліджень, формування режиму навантаження елементів колон для подальшої оцінки її технічного стану і прогнозування ресурсу. Увага авторів була обмежена колонами пресу зусиллям 100 МН. Слід зауважити, що неналежний технічний стан пресу призводить до випуску некондиційних коліс. Внаслідок технологічних помилок в роботі пресу зусиллям 100 МН припадає 13% браку [1].

В основу моделювання процесу навантаження колон покладена концепція формалізованих блоків, що фактично, являють собою типову історію навантаження [2].

Особливості проєктування і експлуатації колон. Колони гідравлічних пресів, разом із з головними циліндрами, являються найбільш напруженими і найбільш відповідальними базовими елементами. Саме в корпусах гідроциліндрів спостерігаються найбільші напруження, які в місцях локалізації досягають 420–520 МПа. Ясно, що в такому разі деталь має обмежену довговічність. Але виробники-розробники пресів нічого про це не заявляють. На думку фахівців сервісних організацій, відсутність нормативних строків експлуатації для станин є непрямим свідоцтвом їхньої необмеженої довговічності.

Як показують дослідження, в литих поперечинах пресів номінальні напруження складають безпечні 50 МПа, але в охресті отворів вони збільшуються до 125 МПа. В стойках станин пресів закритого типу номінальні напруження доходять до 115 МПа. При проєктуванні конструктори намагаються забезпечити запас міцності станин пресів рівним 2-2.5, на деяких пресобудівних заводах регламентоване допустиме напруження в 120 МПа. Іноді на вимогу замовника виробники дають 15-річну гарантію на прес. З цього витікає, що довготривала безпечна робота пресів можлива тільки за умов регулярного діагностування технічного стану станин.

При продовженні ресурсу пресів фахівці основну увагу зосереджують на ретельному обстеженні стану станин, пошуку місць утворення тріщин і подальшому їх відновленні (заварка, наплавлення, місцева поверхнево-пластична обробка). Це має практичну направленість. Методологічне забезпечення при цьому дещо застаріле і містить розрахунок станин за МСЕ, випробування зразків матеріалу (в деяких випадках) і детермінований розрахунок запасів втомної міцності.

В той же час, нормативними документами певних галузей виробництва на порядок продовження строків безпечної експлуатації технічних пристроїв передбачається визначення залишкового ресурсу. Різні алгоритми оцінки залишкового ресурсу порізному прогнозують його величину. Варто робити багатоваріантний розрахунок довговічності альтернативними методиками. Після цього об'єднання результатів в єдине рішення здійснюється за критерієм мінімізації ризику. Те ж саме можна сказати і про контроль якості заготовок BS ковальських машин. Він повинен здійснюватися різними методами неруйнівного контролю, кожен з яких має свою імовірність виявлення дефекту. Для обрання оптимальної комбінації методів знов таки використовується критерій мінімального ризику.

Методам проєктування пресів здавна приділялося багато уваги [3, 4]. В середині 20 ст. було закладено основні принципи створення колон, які фігурують в даних дослідженнях. На кінцях циліндричних колон розташовано ділянки з упорною різьбою, які затягуються розрізними гайками поверх зовнішніх боків верхніх і нижніх поперечин. Внутрішні поверхні поперечин упираються в конічні бурти колон, створюючи в них зусилля затягання, що перевищує зусилля від робочого навантаження. Розрахунок на міцність ведеться за умов розтягання цією навантагою з додаванням частини зовнішнього зусилля. Також додається напруження від згину при ексцентричному пресуванні. Але це стосується серединної незатягненої частини колон. Питання проєктувального розрахунку колон не втрачають актуальності по теперішній час. За допомогою сучасних пакетів програм оптимізуються форми перерізу і розташування колон гідравлічних пресів за критеріями міцності і опору пересуванню повзуну при експлуатаційних умовах [5].

Надійність колон в значній мірі визначають безпеку пресу. Відомі факти руйнування колон, які, як правило, відбувалися по-декілька на одному пресі. Всі руйнування відбуваються по першому вітку різьби і мають втомний характер, про що свідчать злами колон.

Виконаний аналіз відмов колон показав, що всі вони супроводжуються ослабленням або відсутністю попереднього затягування. Тому не забезпечується сумісна робота системи «колонний стакан – поперечина – колона». Відсутність затягування викликає значне збільшення амплітуди напружень у витках зовнішньої різьби і розкриття стиків між гайками колон і поперечиною. Хоча деякі фахівці вважають, що затягання є шкідливим, оскільки збільшує загальне зусилля. Дійсно, незмінна (так би мовити, статична) складова загального зусилля збільшується, але разом з тим зменшується амплітуда циклічного зусилля, яке саме і призводить до втомного процесу. Можна вважати, що ослаблення затягання призводить до збільшення коефіцієнту зовнішнього навантаження χ. Оцінка надійності, яка виконана за теорією подоби втоми, показала зменшення запасу міцності при руйнуванні колони до 0.38, а номінальне напруження складало σ=63 МПа.

Робота колон з розкритими стиками створює умови для виникнення динамічних навантажень і проникнення агресивного середовища. Тому до виникнення тріщин втоми в тілі колони різьба колон може бути частково або повністю зруйнована за рахунок спільної дії корозії, ударних навантажень і фретинг-зносу. Розкриття стиків порушує геометрію рами та погіршує якість штамповки.

Причини, які призводять до руйнування у місці переходу гладкої частини колони у різьбову частину, обумовлені високою концентрацією напружень в тій зоні і появою там згинальних напружень при ексцентричному прикладанні технологічного зусилля. Ексцентричне штампування разом із різьким скиданням тиску в приводах також призводить до розкриття стиків і до збільшення навантаження на виток різьби. Відомі конструкторські рішення для подолання цих недоліків, і які націлені на підвищення надійності пресів [6-8]. На жаль описам цих рішень бракує кількісного аналізу для підтвердження запропонованих модернізацій.

Обов'язковість термічного затягання різьбового з'єднання ставить проблему її рівномірності між колонами, які утворюють групове різьбове з'єднання. В станині пресу зусиллям 100 МН є дві групи великогабаритних різьбових з'єднань. Окрім колон, за допомогою групового з'єднання у вигляді вісьмох стяжок (шпильок) закріплюється верхня поперечина. З часом затяжка стає слабшою і її треба відновлювати [9]. Інтенсивність ослаблення нерівномірне, що призводить до клинової виробітки контактної поверхні між гайкою і поперечиною. Рекомендації заводів-виробників пресів відносно технології термозатягування не ефективні для працюючих об'єктів. Тому сервісні організації попередньо моделюють процес термічного затягання, розробляють технології і пристрої попереднього вирівнювання контактних поверхонь, а також і методи затягування, які враховують ряд істотних факторів.

Зусилля пресу 100 МН, створюване тиском головного циліндра, по ланцюгу «поперечка – стяжки – архітрав» передається на колони. Між поперечкою та архітравом встановлено 8 циліндричних проставок. Через поперечину, проставки та архітрав просунуто 8 стяжок, кожна з яких стягнута двома зовнішніми гайками. Таке з'єднання є статично невизначеною системою, в якій розподіл зусиль між окремими елементами силового ланцюга залежить від співвідношення їх жорсткостей. З'єднання повинно забезпечувати не розкриття стиків при дії максимально допустимого навантаження, що можна забезпечити тільки термічної затяжкою стяжок.

При прикладанні до попередньо стиснутого з'єднання «поперечина – проставки – архітрав» робочого навантаження стискаюче зусилля слабшає (з урахуванням знаку напруження збільшується), а попередньо розтягнуті стяжки додатково розтягуються. Таким чином зусилля, що створюється пресом, розподіляється між ланцюжками «поперечина – стяжки – архітрав» та «по-перечину – проставки – архітрав» відповідно до співвідношення їх жорсткостей.

Якість затягання вимірюється двома показниками. Першій - це коефіцієнт нерівномірності навантаження колон:

$$k_{ir} = \frac{\left| F_{cp} - F_{\max(\min)} \right|}{F_{cp}} , \qquad (1)$$

де F_{cp} – середнє навантаження поміж чотирьох колон,

$F_{max(min)}$ – максимальне або мінімальне навантаження в колоні, яке забезпечує найбільшу різницю.

Другий показник κ_{bnd} характеризує наявність згинальних напружень σ_{bnd}, які виникають поряд із напруженнями розтягання σ в вільній частині колони:

$$k_{bnd} = \frac{\sigma_{bnd}}{\sigma} . \qquad (2)$$

Ремонтний персонал підприємства використовує такі граничні показники: $[k_{ir}]=0.15$, $[k_{bnd}]=0.3$. Для контролю цих показників використано тензометрування колон в процесі пресування. Воно відбувається після ремонтно-монтажних операцій, коли необхідно вирішити питання їх закінчення або продовження.

Однак, з наукової точки зору подібні досліди дають значно більшу інформацію. По-перше, є актуальним визначення зусилля пресування х урахуванням типорозміру коліс, що виготовляються. Відомі емпіричні залежності для оцінки цього зусилля, які враховують, головним чином, площу заготовки і межу плинності її матеріалу при температурі деформування [10]. Є можливість вимірювання зусилля пресування при штампуванні за тиском робочої рідини в гідросистемі. Обидва способи не є прямими, тому можуть вважатися оціночними.

По-друге, варто спрогнозувати залишковий ресурс колон з врахуванням фактичних умов експлуатації. При проєктуванні колони перевірялися на опір втомі при максимальних зусиллях. Прес працює при менших зусиллях за максимальні на 15-30%. З цього боку є підстави для продовження призначеного ресурсу. З іншого боку, елементи пресу, зокрема колони, потерпають від позапроєктних умов. До них може бути віднесено понаднормовані нерівномірність та ексцентровість навантаження, які супроводжують фактичні умови. Якщо такі факти не враховано, то прогнозний ресурс буде зменшено. Тому і йдеться про реальний режим навантаження, який треба сформувати на підставі тензометрування.

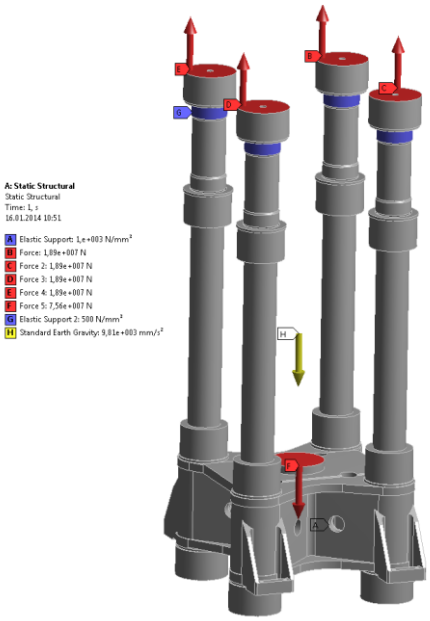


Рисунок 1 - Схема навантаження пресу 100 МН для розрахунку станини методом скінчених елементів

По-третє, внутрішні силові фактори колон є зовнішнім навантаженням при розрахунках напруженого стану поперечин станини (рис. 1). Від достовірності їх моделювання залежіть точність визначення напружень в решті елементів станини. З огляду на сказане, тензометрування колон мало на **меті** оцінку якості затягання і монтажу колон, визначення зусиль пресування і характер їх передачі на колони, прогнозування гарантованого залишкового ресурсу і отримання вихідних даних для моделювання напружено-деформованого стану базових елементів станини.

Формування режиму навантаження за результатами тензометрування. Тензометрування колон проведено Випробувальним центром УДУНТ за участю деяких авторів. На протязі 6-8 років було проведено декілька циклів випробувань на різних стадіях експлуатації пресу 100 МН. По окружності кожної з 4 колон преса встановлювалося 3-4 тензорезистори на 2 ярусах. Це дозволяло визначити напруження розтягування σ і згину σ_{bnd}, а також осьове навантаження на колону F_i . Вимірювання відбувалося в процесі штампування коліс різного діаметру [11].

За одне штампування колісної заготовки спостерігається один цикл навантаження в колонах. Синхронно з цим відбувається один цикл навантаження в різьбових стяжках поперечини. Цикл навантаження близький до віднульового. Динамічні явища в елементах станини пресу не є розвиненими. Незважаючи, що в робочій рідині спостерігаються суттєві гідродинамічні процеси [12]. Це свідчить про те, що динаміка є замкненою між заготовкою і гідроприводом і не передається на станину.

Використана методика тензометрування дає змогу визначати осьові зусилля в колонах $F_{1(2)(3)(4)}$, за допомогою яких може бути визначено зусилля пресування $F=\Sigma F_{1(2)(3)(4)}=4\cdot F_m$.

Проаналізувавши результати вимірів можна зробити певні узагальнення. За середніми значеннями вимірів зусилля пресування коліс D_k=957 мм прийнято $F_{D=957}$=70.3 МН, а для коліс D_k=1062 мм прийнято $F_{D=1062}$=91.4 МН. Це відповідає відомим емпіричним залежностям, які рекомендовано для апріорного розрахунку силових параметрів пресування [10]. Згідно них, зусилля F пропорційне площі заготовки. Тоді для круглої заготовки дійсне співвідношення $F_1= F_2\cdot(D_{k1}/ D_{k2})^2$. Тоді для заготовки D_k=1062 мм маємо:

$F_{D=1062}= F_{D=957}\cdot(1062/957)^2$=86.6 МН.

Це на 6% менше від фактично прийнятого значення, що є задовільним. В цілому, прес працює на 75-90% своєї потужності, що можна вважати раціональним.

Коефіцієнт нерівномірності k_{ir}, практично, співпадає з коефіцієнтом варіації навантаження колон v_{ir}. Їхня величина варіюється майже в 10-кратному діапазоні від 3% до понад 30%. Цікаво, що спостерігається, так би мовити, діагоналева нерівномірність навантаження колон. Тобто, внутрішня нерівномірність між двома парними і непарними колонами є меншою, аніж нерівномірність поміж обома парами колон.

Збільшення нерівномірності навантаження сприяє збільшенню зусилля пресування. Таке можна пояснити появою горизонтальної складової реакції з боку заготовки F_{ir}, яка зменшує зусилля, яке необхідне для деформування F (рис. 2).

Також заслуговує на увагу явище вирівнювання навантаження між колонами після високих зусиль пресування. Це свідчить, що зусилля затягання різьби піддається впливу багатьох чинників і його потрібно контролювати.

Колона представляється як механічна система, що складається з двох елементів: вільна частина E_1 і різьбова частина E_2 (рис. 2). Тоді ресурс колон можна визначати за правилом об'єднання індексів безпеки [2].

Насамперед, зусилля на колону $F_{c1(2)(3)(4)} = F_i$ залежіть від розміру заготовки, яка штампується. Оскільки основний вироблюваний сортамент становлять колеса розміром 957 мм, а посилені умови експлуатації пов'язані з виробництвом коліс діаметром 1062 мм, то блок навантаження можна складати з двох рівнів. 1-й рівень має відносну тривалість c_{D1}=0.75-0.9 при зусиллі в колоні F_{cD1}=18.225 МН. Тоді 2-й рівень має параметри: c_{D2}=0.25-0.1 при зусиллі в колоні F_{cD2}=22.85 МН.

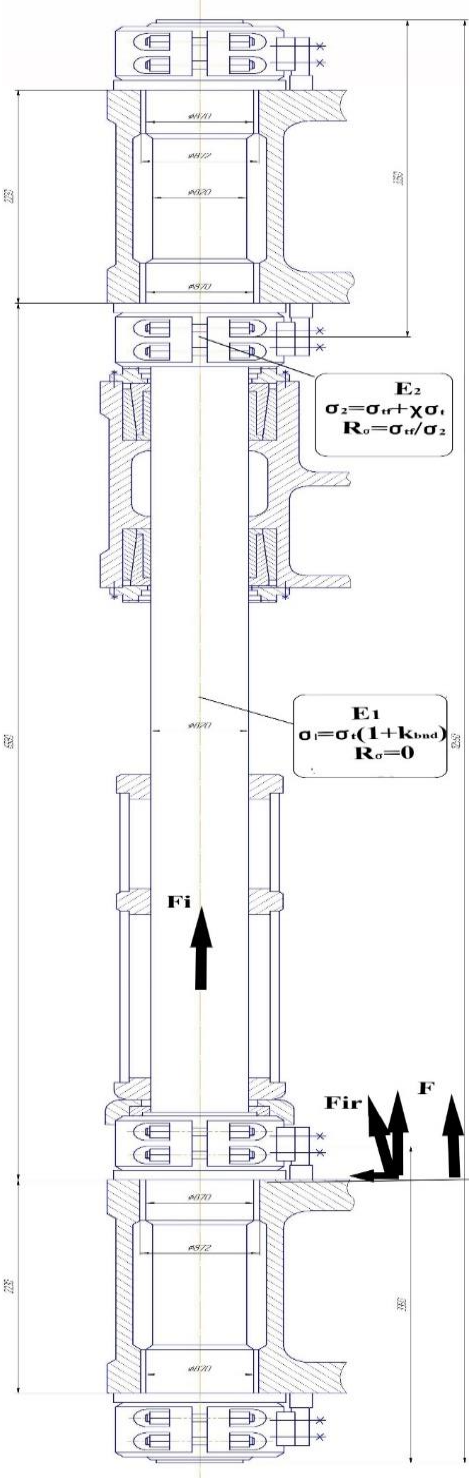


Рисунок 2 - Розрахункова схема колони пресу 100 МН

Встановлені зусилля F_{cD1} і F_{cD2} мають зміст середніх значень рівня навантаження. Фактично, зусилля розподіляються нормально з коефіцієнтом варіації v_{D1} і v_{D2}. Вони визначаються за формулою складання помилок:

$$v_{D1(2)} = \sqrt{v_{ir}^2 + v_F^2} \ . \qquad (3)$$

Природньо, що цей показник залежіть від нерівномірності навантаження колон v_{ir}, Окрім цього, здійснює вплив і варіація зусилля пресування v_F. Вона визначається, головним чином, варіацією межі плинності матеріалу заготовки. Тоді можна вважати v_F=0.1. Звідси випливає, що v_{D1}=v_{D2}= v_{Σ}.

Відома ступінчаста апроксимація безперервного розподілення навантаження колони F_{cP} з кроком 0.75·v_D, що забезпечувало 7-рівневий блок. Для порівняно невисоких коефіцієнтів варіації (які спостерігаються при штампуванні коліс) такий блок можна замінити 2-рівневим. 1-й рівень має показники F_{cD2} або F_{cD1}, $c_{v1(3)}$=0.885; 2-й рівень має показники $F_{c2,4}$=$F_{cD2(1)}$(1+2.25v_{Σ}), $c_{v2(4)}$=0.115. Таким чином, блок навантаження колони складається з 4 рівнів (табл. 1). Для них відносна тривалість визначається як c_j= c_{vj}·$c_{D2(1)}$. Тут j=1,2,3,4 – номер рівня блока навантаження.

Отримавши навантажувальні блоки, є можливість визначити еквівалентне зусилля розтягування в колоні:

$$F_{ceq} = \sqrt[m]{\Sigma\left(c_i F_{ci}^m\right)}. \qquad (4)$$

Тут показник m взято із кривої багатоциклової втоми, яка побудована в подвійних логарифмічних координатах. В подальшому для елементів колони знаходять еквівалентні напруження, за якими через рівняння довговічності буде вираховуватися ресурси.

Таблиця 1. Режим навантаженності колон, зусилля розтягування в них і їхнє еквівалентне значення F_{ceq}, які виражені в МН

№	Тип прогнозування	Стан колони		Доля виробництва коліс великого діаметру, c_{D2}=0.25				Доля виробництва коліс великого діаметру, c_{D2}=0.10			
		k_{ir}, %	v_{Σ}, %	c_1= 0.66	c_2= 0.09	c_3= 0.22	c_4= 0.03	c_1= 0.80	c_2= 0.10	c_3= 0.09	c_4= 0.01
1	Групове для 4-х колон	15	18	18.2	25.6	22.9	32.1	18.2	25.6	22.9	32.1
				F_{ceq}=23.45				**F_{ceq}=21.90**			
2	Групове для 4-х колон	30	32	18.2	31.4	22.9	39.3	18.2	31.4	22.9	39.3
				F_{ceq}=28.00				**F_{ceq}=26.00**			
3	Індивідуальне для кожної колони	0	10	18.2	22.3	22.9	28.0	18.2	22.3	22.9	28.0
				F_{ceq}=21.50				**F_{ceq}=20.20**			
4	Індивідуальне для найбільш навантаженої колони	30	32	23.7	29.0	29.7	36.4	23.7	29.0	29.7	36.4
				F_{ceq}=28.00				**F_{ceq}=26.30**			

Величина F_{ceq} залежіть від типу прогнозування. При груповому прогнозуванні визначається технічний стан і залишковий ресурс всіх 4 колон разом. При цьому враховується коефіцієнт нерівномірності k_{ir}. Процедура прогнозування спрощується, але колони треба міняти (відновлювати) комплектом. В цьому відношенні зручніше індивідуальне прогнозування, коли відновлювальні заходи стосуються лише однієї колони. Але тоді необхідно моніторити навантаженість колон і її варіація визначається величиною v_F=v_{Σ}=0.1. Зменшення варіації навантаження призводить до зменшення еквівалентного зусилля. Тому індивідуальне прогнозування дає змогу збільшити ресурс. Проте, якщо спостерігається висока нерівномірність, то для найбільш навантаженої колони переваги індивідуального прогнозування зникають (строчка №4 співпадає зі строчкою №2, табл. 1). Таким чином, індивідуальне прогнозування варто застосовувати при нормативних умовах експлуатації для пошуку резервів ресурсу.

В вільній частині колони (E_1, рис. 2), окрім розрахункових напружень розтягування σ_t, можуть діяти «позаштатні» згинальні напруження σ_{bnd}. Зазвичай, ці напруження складаються і загальні напруження можуть бути визначеними через коефіцієнт згину $к_{bnd}$ (рис. 2):

$$\sigma_1 = \sigma_t(1 + k_{bnd}) \ . \qquad (5)$$

Результуючі напруження σ_1 в умовах ексцентричного навантаження можуть в 2 рази перевищувати розрахункові. Напруження σ_1 є максимальними напруженнями циклу, який має коефіцієнт асиметрії R_{σ}=0.

Максимальне напруження циклу в корені різьби (E_2, рис. 2), затягнутої з напруженням σ_{tf} визначається як:

$$\sigma_2 = \sigma_{tf} + \chi\sigma_e = \sigma_{\min} + 2\sigma_a \ . \qquad (6)$$

Звідси видно, що амплітудне напруження σ_a залежіть від зовнішнього навантаження колони F_{ceq} і відповідного йому напруження на внутрішньому ді-

аметрі різьби та коефіцієнта сприйняття зовнішнього навантаження:

$$\sigma_a = \frac{1}{2}\chi\sigma_e \,. \qquad (7)$$

Це напруження потрібно використовувати в рівнянні кривої втоми. Величина χ визначається через податливості затягнутої частини колони λ_c і податливості комплекту затягнутих елементів поперечини λ_d: $\chi = \lambda_d/(\lambda_c + \lambda_d)$. Для пресу, що розглядається, розраховано χ=0.4. Циклювання відбувається зі змінною для кожного рівня блоку асиметрією $R_\sigma = \sigma_{tf}/\sigma_2$ (рис. 2).

Вплив виробництва коліс великого діаметру. Сортамент продукції колесопрокатної лінії включає колеса по зовнішньому діаметру від 725 мм до 1269 мм і масою від 270 *кг* до 1100 *кг*. В даний час освоєно виробництво понад 80-ти типорозмірів вагонних та локомотивних коліс. Велика кількість замовлень пов'язана з експортними поставками, за рахунок чого урізноманітнюється технологія операцій, яке виконує обладнання. Така різноманітність призводить до нестаціонарності навантаження елементів станини. В 21 ст. асортимент виготовлюваних коліс обмежувався 30 типорозмірами.

Переважна більшість вироблених коліс припадає на діаметр 957 мм, і складає 75 - 89%. Цей розмір відповідає внутрішньому ринку України. Решта складається з групи діаметрів, таких як Ø920 мм, Ø924 мм, Ø928 мм, Ø929 мм, Ø1062 мм. На них припадає від 0,15% до 14% виробництва коліс в рік від всього обороту. Тому Ø957 мм являється основним діаметром вироблених коліс в рік, ці колеса призначені для внутрішнього ринку залізничних коліс, та є найпоширенішими на даний момент в Україні.

Виникає питання, наскільки репрезентативні отримані результати. Для цього варто проаналізувати продуктивність лінії. Зважаючи на цикл пресування, який за паспортом пресів складає 34 секунди, отримуємо годинну продуктивність 106 коліс. При 8000 годин роботи цеху на рік маємо річне виробництво 847500 коліс, або 2330 штук/добу, або 70623 штук/місяць. Ці цифри мають оціночний характер. Абсолютне місячне виробництво коліс за період спостерігання складало 46150, серед яких 41000 припадало на колеса Ø957 мм. Тобто, в той час лінія працювала (працює) приблизно на 65% своєї потужності. Означена кількість коліс Ø957 мм можна вважати стабільним замовленням. Тому їхня доля в загальному об'ємі виробництва ніколи не буде меншою від 50%. Навантаження пресу, яке відповідне зусиллю пресування коліс Ø957 мм буде медіанним при формуванні навантажувального режиму.

При штампуванні коліс великого діаметру виникають найбільші зусилля, які досягають понад 90% всієї потужності преса. Тому інформація про вплив долі виробництва таких коліс на експлуатаційні показники є актуальною.

При збільшенні долі c_{D2} збільшуються еквівалентні зусилля і напруження розтягування в колонах (рис. 3). Найбільш інтенсивно таке зростання спостерігається на початковій ділянці функції $F_{ceq}(c_{D2})$ від c_{D2}=0 до c_{D2}= 0.15 – 0.2. Дану функцію можна представити двома лінійними ділянками:

$$F_{ceq} = F_{ceq0} + k_{ceq}c_{D2}\,, \qquad (8)$$

$$\sigma_e = \sigma_{e0} + k_{\sigma e}c_{D2}\,. \qquad (9)$$

Перший член цих рівнянь F_{ceq0} і σ_{e0} являє собою еквівалентні зусилля і напруження в колонах при c_{D2}=0 (виробництво тільки коліс діаметром меншим за 957 мм) (табл. 2). На другій ділянці експлуатаційні показники змінюються із суттєво меншою інтенсивністю: величини κ_{ceq} і $\kappa_{\sigma e}$ стають на порядок нижчими.

Таблиця 2. Показники рівнянь $F_{ceq}(c_{D2})$ і $\sigma_e(c_{D2})$

Функція	Ділянка c_{D2}<0.2				Ділянка c_{D2}>0.2
	F_{ceq0}	σ_{e0}	κ_{ceq}	$\kappa_{\sigma e}$	κ_{ceq}, $\kappa_{\sigma e}$
F_{ceq}	20 МН	-	20 $МН^{-1}$	-	2.2 $МН^{-1}$
σ_e	-	37 МПа	-	30 $МПа^{-1}$	3.2 $МПа^{-1}$

Аналогічна поведінка, але в протилежний бік, спостерігається для функції довговічності від долі виробництва коліс великого розміру c_{D2} (рис. 4) Найбільш інтенсивне падіння ресурсу від довговічності колони при відсутності виробництва великогабаритних коліс спостерігається до величини c_{D2}= 0.15 – 0.2. Далі інтенсивність падіння зменшується на порядок.

За порівняльну базу тут прийняті довговічність і еквівалентне напруження при c_{D2}=0 в умовах нормованого значення нерівномірності навантаження колон (k_{ir}=0.15). Зміну ресурсу від величини c_{D2} за аналогією з еквівалентним зусиллям можна представити двома лінійними ділянками.

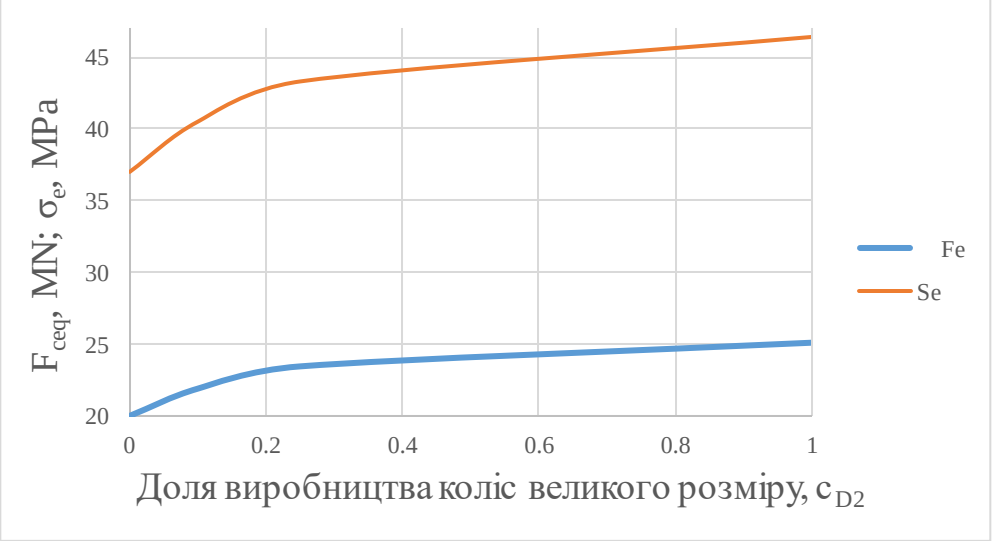


Рисунок 3 - Вплив долі виробництва коліс великого розміру c_{D2} на еквівалентні зовнішні зусилля F_{ceq} і напруження σ_e (S_e) в різьбовій частині колони

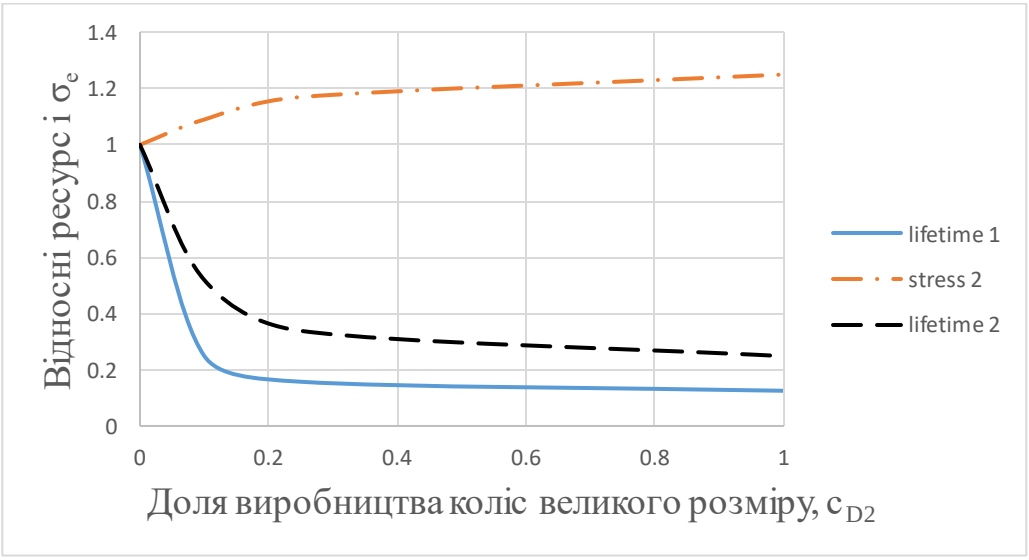


Рисунок 4 - Вплив долі виробництва коліс великого розміру c_{D2} на відносні ресурс в вільній (lifetime 1) і різьбовій частині колони (lifetime 2), а також на відносні еквівалентні напруження (stress 2) в різьбовій частині колони

Наведені графіки розвіюють відому думку про те, що для підтримки надійності преса треба зменшити долю виробництва коліс діаметром 1062 мм. В дійсності, при c_{D2}=0.1 ресурс колон зменшується вже вдвічі. Тому для збереження ресурсу треба, практично, зовсім виключити виробництво великогабаритних коліс. Якщо все ж таки виробнича програма вміщує наявність такого сортаменту, то ресурс відносно базового складе 30 – 25%. Причому, не має суттєвого значення доля c_{D2}: чи це 0.25, чи це 0.50.

Висновки. 1. З огляду літературних джерел стає ясним, що дослідження в області міцності і надійності станин важких гідравлічних пресів широко ведуться і є актуальними. Особливої актуальності вони набули у зв'язку з необхідністю продовження ресурсу пресів після їхньої довготривалої експлуатації. Такий захід має чималий економічний сенс. Найбільш небезпечним елементом станини є колони, які в свою чергу мають різьбове з'єднання як найбільш вразливе місце.

2. Розроблено і застосовано спосіб визначення зусилля штампування на гідравлічних пресах шляхом тензометрування колон. Визначені місця розташування 4 тензодатчиків по окружності колони на 2-х її ярусах. Такий підхід дозволяє відокремити осьові деформації від згинальних і визначити такі показники технічного стану станини, як коефіцієнти згину і нерівномірності навантаження колон.

3. За результатами експериментального вимірювання навантаженності станини пресу зусиллям 100 МН при виробництві залізничних коліс з'ясовано, що процес штампування однієї заготовки визиває один пульсуючий цикл зміни напружень в елементах станини. Середнє зусилля при пресуванні коліс діаметром 957 мм складає 70.3 МН, а

для коліс діаметром 1062 мм прийнято зусилля 91.4 МН. Це відповідає відомим емпіричним залежностям, які рекомендовано для апріорного розрахунку силових параметрів пресування. Згідно них, зусилля пропорційне площі заготовки.

4. Сформовано типовий режим навантаження елементів колони преса у вигляді блока з 4-х рівнів. При цьому враховують варіації зусилля пресування, нерівномірності навантаження колон і долю виробництва коліс великого діаметру. Встановлено, що величина останньої складає від 25 до 7%.

5. Вплив на ресурс колон виробництва коліс великого діаметру моделюється через їх долю в загальному сортаменті c_{D2}=0.1. Найбільш інтенсивно, а саме вдвічі, ресурс колон зменшується, коли c_{D2}<0.1. Подальше збільшення долі c_{D2}>0.1 вже незначно зменшує ресурс колон відносно ситуації, коли виробляються тільки колеса звичайного розміру.

Бібліографічний опис.

1. Анализ причин отказов основного технологического оборудования КПЦ завода ПАО «Интерпайп НТЗ»/ Н. Г. Малич, И. А. Мазур, П. В. Удовик, А. В. Великий. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. - 2015. - №7. - С. 193-196.

2. Прогнозирование работоспособности листопрокатных валков /С. В. Белодеденко, В. М. Горяной, И. Бух, А. В. Яцуба. *Проблемы прочности*. – 2014. - №5. - С. 89-95.

3. Винокурский Х. А. Расчет колонн гидравлических прессов. - 1950 – М., Свердловск: Машгиз. - 80 с.

4. Мюллер Э. Гидравлические прессы и их приводы. Ковочные прессы. М.: Машиностроение. - 1965. - 316 с.

5. Design and Optimization of the Slide Guide System of Hydraulic Press Based on Energy Loss Analysis /M. Gao, H. Huang , Z. Liu , Xi.Li and J. W. Sutherland. Energies, 2016, 9, 434; 15 p. doi:10.3390/en9060434.
www.mdpi.com/journal/energies

6. Пат. 149909 Україна, МПК (2006) B 21 J 9/00. Гідравлічний кувальний прес /О. Є.Марков, В. В. Коткова, В. О. Пужановський. Заявник та власник патенту Донбаська державна машинобудівна академія. – № u202103115; заявл. 07.06.2021; опубл. 15.12.2021, бюл. № 50.
– 5 с https://sis.ukrpatent.org/uk/search/detail/1668462/

7. Пат. 149408 Україна, МПК (2006) B 21 J 9/00. Гідравлічний кувальний прес /О. Є.Марков, В. В. Коткова, М. С. Рязанцев. Заявник та власник патенту Донбаська державна машинобудівна академія. – № u202101987; заявл. 15.04.2021; опубл. 17.11.2021, бюл. № 46.
– 4 с. https://sis.ukrpatent.org/uk/search/detail/1638624/

8. Пат. 148036 Україна, МПК (2006) B 21 J 9/00. Пристрій для підвищення надійності та жорсткості станини колонного типу гідравлічного преса /О. Є. Марков, Я. Є. Пиц, Д. О. Бочковой; Заявник та власник патенту Донбаська державна машинобудівна академія. – № u202008128; заявл. 18.12.2020; опубл. 30.06.2021, бюл. № 26. – 4 с https://sis.ukrpatent.org/uk/search/detail/1602242/

9. Идентификация, оценка и практика повышения надежности оборудования прессопрокатной линии для производства цельных железнодорожных колес /В. А. Зданевич, Б. П. Рябов, С. В. Зданевич и другие. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2000, №6, - С. 73-77.

10. Бибик Г.А. Производство железнодорожных колес. - М.:Металлургия. - 1982. – 232 с.

11. Исследование нагруженности и напряженности базовых элементов тяжелых гидравлических прессов металлургического производства /В. И. Гануш, Н. П. Островерхов, А. В. Султан, Е. М. Дзичковский, А. Е. Кривчиков // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* - 2015, №7, С. 121 – 127.

12. Мазур І. А. Удосконалення гідромеханічних систем спеціальних машин колесопрокатного виробництва: автореф. дис. канд. техніч. наук: 05.05.08. Національна металургійна академія України. Дніпропетровськ. - 2003. 18 с.

References.

1. Analysis of the causes of failures of the main technological equipment of the wheel-rolling shop of the Interpipe NTZ plant /N. Malich, I. Mazur, P. Udovik, A. Velikiy. *Metallurgical and mining industry*. - 2015. - №7. - P. 193-196.

2. Forecasting the working capacity of sheet rolls /S. Belodedenko, V. Gorianoy, I. Bukh, A. Yatsuba. *Strength issues*. – 2014. - №5. - P. 89-95.

3. Vinokursky Kh. A. Calculation of hydraulic press columns. - 1950 - M., Sverdlovsk: Mashgiz. - 80 p.

4. Muller E. Hydraulic presses and their drives. Forging presses. Moscow: Mechanical engineering. - 1965. - 316 p.

5. Design and Optimization of the Slide Guide System of Hydraulic Press Based on Energy Loss Analysis /M. Gao, H. Huang , Z. Liu , Xi.Li and J. W. Sutherland. Energies, 2016, 9, 434; 15 p. doi:10.3390/en9060434.
www.mdpi.com/journal/energies

6. Patent 149909 Ukraine, IPC (2006) B 21 J 9/00. Гідравлічний кувальний прес /O. Markov, V. Kotkova, V. Puzhanovsky. The applicant and owner of the patent is the Donbas State Machine-Building Academy. – № u202103115; declared 07.06.2021; published 15.12.2021, bulletin № 50. – 5 c.
https://sis.ukrpatent.org/uk/search/detail/1668462/

7. Patent 149408 Ukraine, IPC (2006) B 21 J 9/00. Гідравлічний кувальний прес /O. Markov, V. Kotkova, M. Ryazantsev. The applicant and owner of the patent is the Donbas State Machine-Building Academy. – № u202101987; declared 15.04.2021; published 17.11.2021, bulletin № 46. – 4 c.
https://sis.ukrpatent.org/uk/search/detail/1638624/

8. Patent 148036 Ukraine, IPC (2006) B 21 J 9/00. A device for increasing the reliability and rigidity of the column-type hydraulic press bed /O. Markov, Y. Pyts, D. Bochkovoy; The applicant and owner of the patent is the Donbas State Machine-Building Academy. – № u202008128; declared 18.12.2020; published 30.06.2021, bulletin № 26. – 4 c. https://sis.ukrpatent.org/uk/search/detail/1602242/

9. Identification, evaluation and practice of improving the reliability of the equipment of the press-rolling line for the production of solid railwaywheels /V. Zdanevich, B. Riabov, S. Zdanevich and others. *Metallurgical and mining industry*. – 2000, №6, - C. 73-77.

10. Bibik G. A. Railway wheel production. - M.: Metallurgy. - 1982. – 232 p.

11. Investigation of the loading and tension of the basic elements of heavy hydraulic presses of metallurgical production /V. Hanush, N. Ostroverhov, A. Sultan, E. Dzichkovskii, A. Krivchikov. *Metallurgical and mining industry.* - 2015, №7, P. 121 – 127.

12. Mazur I. A. Improvement of hydromechanical systems of special wheel-rolling machines: autoref. thesis candidate technician of science: 05.05.08. National Metallurgical Academy of Ukraine. Dnipropetrovsk. - 2003. 18 p.

УДК 669.187

Голуб І. В.

Дослідження поведінки шлакової системи при обробці металу газовою сумішшю з підвищеним вмістом азоту

Holub I. V.

Study of slag system during metal treatment with gas mixture with high nitrogen content

Мета. Вивчення впливу шлакового покрову на видалення газів (водню та азоту) при обробці металу газовою сумішшю. Одним з найбільш поширених способів ковшової обробки сталі є процес продування металу інертними газами та її вакуумування.

Методика. Математична модель, яка дозволяє розглядати процес видалення і розраховувати кількісні показники видалення розчинених газів з металу при позапічній обробці.

Результати. При продуванні аргоном метал на установці ківш-піч поверхня металу повинна бути відкритою від шлаку, але при цьому відбувається паралельний перехід газу з атмосфери в метал, оскільки шлак є захисним покривом металу від атмосфери також доказано, що сспінювання шлаку впливає лише на вміст азоту в металі.

Наукова новизна. Розгляд термодинамічних та кінетичних особливостей розчинення азоту в металі при продувці інертними газами металу в ковші та при вакуумуванні дозволили з'ясувати тепло та масообміні процеси поведінки газів у металі що приведе до можливостей розробки нової технології ковшової обробки металу із застосуванням інертних газових сумішей.

Практична значущість. Використовувати суміш газів, що містить азот, при продувці можливо за рахунок ведення процесу обробки металу під спіненим шлаком, бо процес видалення азоту йде значно швидше тому є можливість розширити класу для якого можливо використовувати суміш газів при продувці сталі.

Ключові слова: метал, газова суміш, азот, шлак, позапічна обробка

Goal. Study of the influence of the slag cover on the removal of gases (hydrogen and nitrogen) during metal processing with a gas mixture. One of the most common methods of ladle processing of steel is the process of blowing the metal with inert gases and vacuuming it.

Method. The mathematical model considers the removal process and calculates quantitative indicators of the removal of dissolved gases from metal during out-of-furnace processing.

The results. When blowing metal with argon on a ladle-furnace installation, the surface of the metal must be open from the slag, but at the same time there is a parallel transition of gas from the atmosphere into the metal, since the slag is a protective coating of the metal from the atmosphere, it has also been proven that the foaming of the slag affects only the nitrogen content in the metal .

Scientific novelty. Examination of the thermodynamic and kinetic features of nitrogen dissolution in metal during blowing with inert gases in the ladle and during vacuuming made it possible to find out the heat and mass transfer processes of the behavior of gases in the metal, which will lead to the possibility of developing a new technology of ladle processing of metal using inert gas mixtures.

Practical significance. It is possible to use a mixture of gases containing nitrogen during purging due to conducting the metal processing process under foamed slag, because the nitrogen removal process is much faster, therefore there is an opportunity to expand the class for which it is possible to use a mixture of gases during purging of steel.

Key words: metal, gas mixture, nitrogen, slag, ladle-furnace installation

Вступ. Для металургійних підприємств України актуальним завданням є розробка технології ковшової обробки металу із застосуванням інертних продувних газових сумішей, що дозволяють знизити собівартість металу. Використання суміші з підвищеним вмістом азоту дозволить снизити собівартість ковшової обробки сталей рядового сортаменту, низьковуглецевих та сталей з підвищеним вмістом азоту.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Протягом багатьох років різні вчені О.М. Морозов, В.І. Явойський, І.М. Чуйко, О.О. Есин та інші вивчали процеси поглинання азоту з металу шлаками різного складу. До кінця так і нез'ясований механізм передачі азоту з атмосфери в метал через шлак і навпаки від металу до шлаку та в атмосферу. Основні висновки вчених [1, 2] про механізми взаємодії азоту зі шлаком, наступні (на основі експериментів):

шлаки будь-якого складу містять розчинений азот;

шлаки беруть участь у процесі передачі азоту з атмосфери до металу;

розчинність азоту в шлаку залежить від основності та ступеня окисленості;

найбільша кількість азоту міститься у шлаку відновлювального періоду основної електросплавки (до 0,23%);

всі рафінувальні шлаки містять близько 0,003% азоту;

концентрація азоту в шлаках однозначно пов'язана з концентрацією його у металі;

не можливо точно визначити форми існування азоту у шлаках (нітриди, карбіди, ціаніди).

Матеріали та методи дослідження. Детальний розгляд термодинамічних та кінетичних особливостей розчинення азоту в металі дозволили з'ясувати тепло та масообмінні процеси поведінки газів у металі при продувці інертними газами металу в ковші та при вакуумуванні. Розроблена математична модель видалення розчинених газів з металу при позапічній обробці дозволяє проаналізувати поведінку газів у металі та підібрати суміш газів яка містить азот для продування різних марок сталі та можливістю проведення подальшого аналіза поведінки газів при безперервному литті заготовок. Розроблений алгоритм дає можливість прогнозу-

вати отримання якісної безперервнолитої заготівки для сталей неспеціального призначення.

Мета і завдання дослідження. Одним з найбільш поширених способів ковшової обробки сталі є продування металу інертними газами та її вакуумування. При цьому відбувається видалення розчинених у металі газів – кисню, водню та частково азоту. Видалення розчиненого кисню здійснюється за рахунок протікання реакції зневуглецьовування

$$[C]=[O]=\{CO\}, \quad (1)$$

Водню та азоту – за рахунок виділення його у вигляді молекул, що утворюють бульбашки газу

$$[H]=\frac{1}{2}H_2. \quad (2)$$

$$[N]=\frac{1}{2}N_2. \quad (3)$$

Процес масообміну в металі відбувається на межі розділу метал-бульбашка. Потоки азоту, водню і кисню з вуглецем, необхідним для утворення CO, бульбашки аргону можуть бути представлені наступними виразами:

$$j_N=\beta_N([N]-[N]_r), \quad (4)$$

$$j_H=\beta_H([H]-[H]_r), \quad (5)$$

$$j_{CO}=1{,}75([O]-[O]_r). \quad (6)$$

Концентрації азоту, водню та кисню, рівноважні з парціальним тиском N_2, H_2 та CO у бульбашках, будуть

$$[N]_r=K_N\sqrt{P_{N_2}}, \quad (7)$$

$$[H]_r=K_H\sqrt{P_{H_2}}, \quad (8)$$

$$[O]_r=P_{CO}/([C]K_C), \quad (9)$$

де K_N, K_H і KC – константи рівноваги реакцій розчинення азоту, водню та окислення вуглецю.

Ці реакції гетерогенні і маси газів, що утворюються в результаті їх протікання, пропорційні площам поверхні бульбашки, на які діють ці потоки. Діяльність прийнято, що площі, зайняті потоками, пропорційні величинам цих потоків. Маси азоту, водню та CO , що дифундують в об'ємі бульбашки

$$m_N=\int_0^\tau \beta_N([N]-[N]_r)S_N d\tau, \quad (10)$$

$$m_H=\int_0^\tau \beta_H([H]-[H]_r)S_H d\tau, \quad (11)$$

$$m_{CO}=1{,}75\int_0^\tau \beta_O([O]-[O]_r)S_{OC} d\tau, \quad (12)$$

де □□□ -час підйому бульбашки. Загальна маса газів, що видаляються в бульбашки аргону, у цьому випадку виходить множенням на частоту їх утворення – □□$_P$, концентрації речовин виражені в кг/м^3.

Парціальні тиску індивідуальних газів у бульбашках розраховувалися за виразом

$$P_i=\frac{(m_i/M_i)P}{\sum(m_i/M_i)}, \quad (13)$$

де M_i - молекулярна маса газу, P - загальний тиск, що дорівнює сумі всіх тисків, що діють на бульбашку з урахуванням висоти товщі металу - h при підйомі бульбашки. Зміст газів у металі розраховувався за різницею концентрацій на попередньому та наступному кроках розрахунку.

Результати дослідження. Вивчення впливу шлакового покриву на видалення газів (водню та азоту). При продуванні аргоном метал на установці ковш-піч виявлено, що при зниженні інтенсивності процесу зневуглецьовування для більш повного видалення газів поверхня металу повинна бути відкритою від шлаку (рис.1, 2).

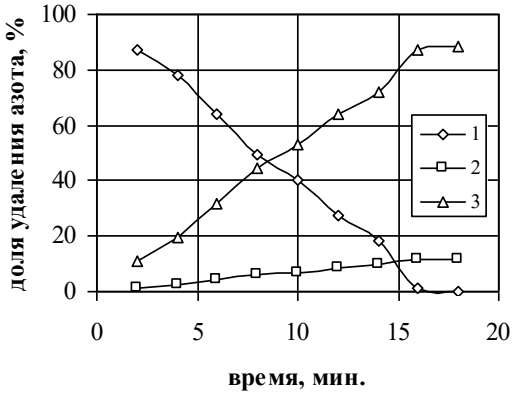


Рисунок 1. Частка видалення азоту 1 - у бульбашку CO, 2 - у бульбашку аргону, 3 - через поверхню, при продуванніі металу аргоном 2 м^3/хв при відкритій поверхні металу від шлаку.

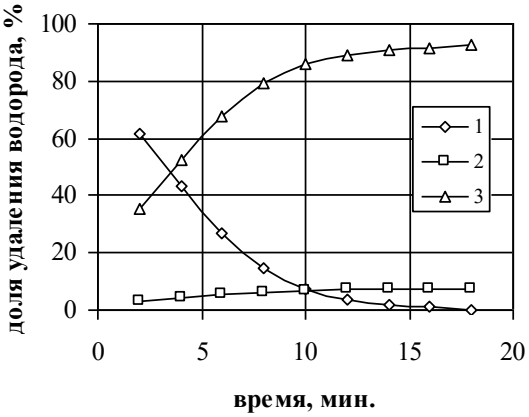


Рисунок 2. Частка видалення водню 1- бульбашку СО, 2 – бульбашку аргону, 3 – через поверхню, при продуванніі металу аргоном 2 м ^{3} /хв при відкритій поверхні металу від шлаку.

Але при цьому постійно відбуватиметься паралельний процес переходу газу з атмосфери в метал (переважно для азоту), оскільки шлак є захисним покривом металу від атмосфери (рис. 3).

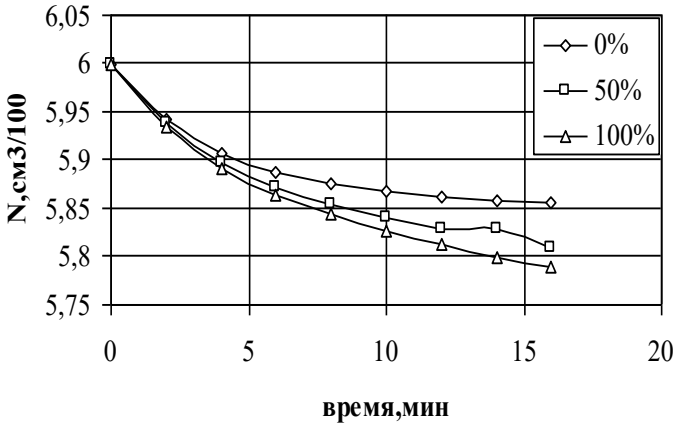


Рисунок 3. Вплив відкритої поверхні видалення азоту при продуванні аргоном 2 м ^{3} /хв.

Обговорення результатів. При аналізі процесу заміни аргону на суміш, що містить азот, відбувається насичення металу азотом, яке залежить від складу та кількості шлаку при обробці металу на УКП. Виявлено, що основне видалення азоту з металу (рис. 2) відбувається за інтенсивного процесу зневуглецьовування в бульбашку СО. Отже, чим довше відбувається процес зневуглецьовування, тим більше азоту залишить метал. Однак при виробництві сталей необхідне суворе дотримання марочного вмісту вуглецю та азоту. Таким чином, використовувати суміш, що містить азот, можливо для отримання більш широкого класу сталей з низьким вмістом вуглецю за рахунок ведення процесу обробки металу під спіненим шлаком на установці ковш-піч. Спінювання шлаку, тобто збільшення його обсягу у кілька разів. Спінений шлак представляє сукупність бульбашок монооксиду та діоксиду вуглецю, розділених тонкими прошарками шлаку. Розмір бульбашок, що становлять дисперсну фазу, лежить в межах від часток до кількох сантиметрів. Утворення та стійкість спіненого шлаку залежить від його фізико-хімічних властивостей (в'язкість, поверхневий натяг, температура), інтенсивності, місця газовиділення та розподілу газових бульбашок за розмірами. Спінювання шлаку впливає лише на вміст азоту в металі [3]. Добре спінювання призводить до зниження вмісту азоту на 10-20 ppm до рівня близько 30 ppm за рахунок інтенсивнішого процесу зневуглецевування і за рахунок захисту металу від атмосфери. Однак, відомо також і негативне явище спінюваності шлаку - викиди шлаку з ковшу і подібне. Контроль спінювання, шлакоутворення і властивостей шлаку, що рафінують, ускладнен, і в основному здійснюється «на око» маючи індивідуальну інтерпретацію.

Проведені дослідження на математичній моделі показують, що процес видалення азоту відбувається інтенсивніше (рис. 4) під час використання спіненого шлаку [4,5].

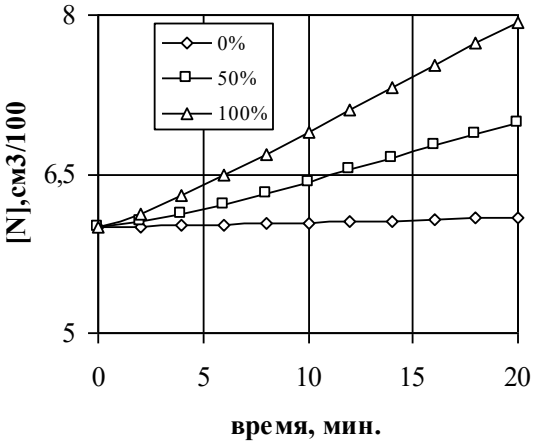


Рисунок 4. Вплив відкритої поверхні видалення азоту під час продування азотом під спіненим шлаком.

Висновки. Використання спіненого шлаку при позапічній обробці металу на установці ківш-піч дозволить розширити асортимент сталей, що виплавляються з використанням як продувний газ азот або його суміш з аргоном, при цьому значно знизиться собівартість одержуваного продукту і не погіршиться властивості металу. Залежно від властивостей і будова шлаків з використанням математичної моделі можливо покращувати процеси газовиділення та більш повного використання азоту як продувного газу.

Бібліографічний опис.

1. Морозов А. Н. Водород и азот в стали / А. Н. Морозов // М.: Металлургиздат, 1950. – 375с.
2. Чуйко Н. М. Азот в твердой и жидкой электростали. / Н. М. Чуйко / Теория и практика металлургии, 1936, № 4. - с.55-72.
3. Лопухов Г. А. Вспенивание шлака при плавке стали в дуговых печах. Фундаментальные исследования физико-химия металлических расплавов / Г.А. Лопухов // М.: ІЦК «Академкнига», 2002. - 469с.
4. Яковлев Ю.Н., Голуб И.В. Исследование на математической модели удаление газов из стали при вакуумировании с продувкой металла газовыми смесями /Ю.Н. Яковлев, И.В. Голуб/ ПДТУ Весник №15, Маріуполь, 2005, с.37-40.
5. Камкина Л. В., Пройдак Ю. С., Стовпченко А.П., Голуб И. В. Совершенствование процессов дегазации стали при внепечной обработке / Л. В. Камкина, Ю. С. Пройдак, А.П.Стовпченко, И. В. Голуб // XV Miedzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna “Produkcja ibzarzadzanie w hutnictwie” Zakopane 27-30.06 2007 czesc 1 pp. 107-111

References.

1. Morozov A. N. Vodorod i azot v stali /A. N. Morozov // Metallurgizdat, 1950. – 375s.
2. Chuyko N. M. Azot v tverdoy i zhidkoy elektrostali. / N. M. Chuyko / Teoriya i praktika metallurgii, 1936, № 4, s. 55-72.
3. Lopukhov G. A. Vspenivaniye shlaka pri plavke stali v dugovykh pechakh. Fundamental'nyye issledovaniya fiziko-khimiya metallicheskikh rasplavov. - M.: ITSK «Akademkniga». 2002.-469s.
4. Yakovlev YU.N., Golub I.V. Issledovaniye na matematicheskoy modeli udaleniye gazov iz stali pri vakuumirovanii s produvkoy metalla gazovymi smesyami /YU.N. Yakovlev, I.V. Golub/ PDTU Vesnik №15, Maríupol', 2005, s.37-40.
5. Kamkina L. V., Proydak YU. S., Stovpchenko A.P., Golub I. V. Sovershenstvovaniye protsessov degazatsii stali pri vnepechnoy obrabotke / L. V. Kamkina, YU. S. Proydak, A.P.Stovpchenko, I. V. Golub // XV Miedzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna “Produkcja ibzarzadzanie w hutni?twie” Zakopane 27-30.06 2007 czesc 1 pp. 107-111

УДК 669.7.018.672

Іванченко Д. В.

Механічні властивості модельного алюмінієво-мідного ливарного сплаву Al - 5% Cu зміцненого фторидом цирконію.

Ivanchenko D.

Mechanical properties of an aluminum-copper model cast alloy Al - 5% Cu strengthened with zirconium fluoride.

Метою роботи є визначення оптимальної кількості зміцнювача, температури розплаву та часу витримки розплаву для отримання якомога більшої міцності алюмінієво-мідного модельного ливарного сплаву Al – 5 % Cu у литому стані. Для проведення необхідних розрахунків було розроблено та реалізовано повний факторний експеримент типу 2^3. У якості факторів, що змінюються, було вибрано кількість фториду цирконію, який у складі комплексного флюсу, вводився у розплав, час витримки комплексного флюсу на поверхні розплаву перед замішуванням та температура розплаву. По результатах експерименту побудовані рівняння регресії у кодованому та явному вигляді. Для представлення рівнянь регресії у явному вигляді застосовувалося налаштування FUNCRES.XLAM програмного забезпечення Microsoft Excel 2007.
ВИЛИВОК, ТЕМПЕРАТУРА, ЧАС ВИТРИМКИ, КІЛЬКІСТЬ ЗМІЦНЮВАЧА

The aim of the work is to determine the optimal amount of reinforcer, melt temperature and melt holding time to obtain the highest possible strength of aluminum-copper model casting alloy Al - 5% Cu in the cast state. To carry out the necessary calculations, a full factorial experiment of type 23 was developed and implemented. The amount of zirconium fluoride, which was included in the complex flux, was introduced into the melt, the time the complex flux was kept on the surface of the melt before mixing, and the temperature of the melt were selected as variable factors. Based on the results of the experiment, regression equations were constructed in coded and explicit form. The FUNCRES.XLAM setting of the Microsoft Excel 2007 software was used to represent the regression equations in an explicit form. CASTING, TEMPERATURE, HOLDING TIME, QUANTITY OF REINFORCER

Аналіз літературних даних та постановка проблеми.

Модельний сплав Al - 5% Cu, подібний за складом до ливарного сплаву АМ5 (відсутній марганець), термічно зміцнюється у зв'язку з утворенням при нагріві під гартування пересиченого твердого розчину міді з наступним розпадом та виділенням дисперсних часток фази $CuAl_2$ [1] . Після зміцнення комплексним флюсом, що вміщує у своєму складі цирконій, останній в основному зосереджується на кордонах зерен у вигляді інтерметалідної сполуки Al_3Zr. Тому у литому та термообробленому стані сплави системи Al-Cu більш міцні та жароміцні, ніж наприклад, деформовані, так як інтерметалідні фази залягають, як правило, по межах зерен і дендритних осередків, утворюючи твердий каркас, що перешкоджає пластичній деформації матеріалу.

Використання для обробки сплаву Al - 5% Cu фториду цирконію, у складі комплексного флюсу, дозволяє підвищити тимчасовий опір розриву і відносне подовження сплаву в литому стані при литті в кокіль приблизно зі 180 до 217 МПа та із 4 до 8,6 % відповідно.

Мета і завдання дослідження.

Для визначення впливу температури, часу витримки та кількості зміцнювача на міцність та відносне подовження алюмінієво-мідного ливарного сплаву Al - 5% Cu було розроблено повний факторний експеримент виду 2^3 [2].

Організація експерименту та результати досліджень

Для реалізації повного факторного експерименту прийняли позначення факторів:

Кількість фториду цирконію, що вводимо у розплав	x_1=0,6….1,8%;
Температура розплаву	x_2=1023…1223 К;
Час витримки	x_3=4…8 хв.;

У якості відгуків прийняті наступні позначення:

Тимчасовий опір розриву	y_1, МПа
Відносне подовження	y_2, %

Вихідні дані повного факторного експерименту та результати досліджень міцності алюмінієво-мідного ливарного сплаву Al - 5% Cu приведемо в табл. 1.

Таблиця 1 – Матриця експерименту 2^3 з двома паралельними дослідами

Номер досліду	Кількість ZrF_4, %	Температура витримки, °С	Час витримки, хв.	Міцність, МПа			Дисперсія досліду
				σ_1	σ_2	$\sigma_{В\ ср.}$	
1	0,6	750	4	175,159	161,005	168,082	100,17
2	1,8	750	4	215,935	217,539	216,737	1,29
3	0,6	950	4	112,039	110,891	111,465	0,66
4	1,8	950	4	111,649	113,049	112,349	0,98
5	0,6	750	8	103,001	104,005	103,503	0,5
6	1,8	750	8	181,352	157,466	169,409	285,27
7	0,6	950	8	122,825	124,875	123,85	2,1
8	1,8	950	8	164,543	161,005	162,774	6,26

Проводимо обчислення коефіцієнтів лінійної моделі міцності сплаву Al - 5% Cu. Складемо матрицю повного факторного експерименту з урахуванням ефекту взаємодії (табл. 2).

Таблиця 2 – Матриця 2^3 (фактори представлено у кодованих значеннях)

Номер досліду	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	y
1	+	-	-	-	+	+	+	-	168,082
2	+	+	-	-	-	-	+	+	216,737
3	+	-	+	-	-	+	-	+	111,465
4	+	+	+	-	+	-	-	-	112,349
5	+	-	-	+	+	-	-	+	103,503
6	+	+	-	+	-	+	-	-	169,409
7	+	-	+	+	-	-	+	-	123,85
8	+	+	+	+	+	+	+	+	162,774

$$b_0 = \frac{168,1 + 216,7 + 111,5 + 112,3 + 103,5 + 169,4 + 123,85 + 162,8}{8} = 146,02$$

$$b_1 = \frac{-168,1 + 216,7 - 111,5 + 112,3 - 103,5 + 169,4 - 123,85 + 162,8}{8} = 19,28$$

$$b_2 = \frac{-168,1 - 216,7 + 111,5 + 112,3 - 103,5 - 169,4 + 123,85 + 162,8}{8} = -18,41$$

$$b_3 = \frac{-168,1 - 216,7 - 111,5 - 112,3 + 103,5 + 169,4 + 123,85 + 162,8}{8} = -6,13$$

$$b_{12} = \frac{168,1 - 216,7 - 111,5 + 112,3 + 103,5 - 169,4 - 123,85 + 162,8}{8} = -9,34$$

$$b_{13} = \frac{168,1 - 216,7 + 111,5 - 112,3 - 103,5 + 169,4 - 123,85 + 162,8}{8} = 6,93$$

$$b_{23} = \frac{168,1 + 216,7 - 111,5 - 112,3 - 103,5 - 169,4 + 123,85 + 162,8}{8} = 21,84$$

$$b_{123} = \frac{-168,1 + 216,7 + 111,5 - 112,3 + 103,5 - 169,4 - 123,85 + 162,8}{8} = 2,61$$

Отже поліном має вигляд:

$y = 146,02+19,28*x_1-18,41*x_2-6,13*x_3-9,34*x_1*x_2+6,93*x_1*x_3+21,84*x_2*x_3+2,61*x_1*x_2*x_3$

Для кожного рядка матриці планування обчислюємо дисперсію досліду:

$$S_1^2 = \frac{(175,159-168,082)^2+(161,005-168,082)^2}{1} = 100,17 \ ;$$
$$S_2^2 = \frac{(215,935-216,737)^2+(217,539-216,737)^2}{1} = 1,29 \ ;$$
$$S_3^2 = \frac{(112,039-111,465)^2+(110,891-111,465)^2}{1} = 0,66 \ ;$$
$$S_4^2 = \frac{(111,649-112,349)^2+(113,049-112,349)^2}{1} = 0,98 \ ;$$
$$S_5^2 = \frac{(103,001-103,503)^2+(104,005-103,503)^2}{1} = 0,5 \ ;$$
$$S_6^2 = \frac{(181,352-169,409)^2+(157,466-169,409)^2}{1} = 285,27 \ ;$$
$$S_7^2 = \frac{(122,825-123,85)^2+(124,875-123,85)^2}{1} = 2,1 \ ;$$
$$S_8^2 = \frac{(164,543-162,774)^2+(161,005-162,774)^2}{1} = 6,26 \ ;$$

Коли кількість повторних дослідів у кожному рядку однакова, однорідність дисперсій перевіряємо критерієм Кохрена, який є відношенням максимальної дисперсії до суми всіх дисперсій, тобто:

$$G^p_{f_1;f_2} = \frac{285,27}{100,17+1,29+0,66+0,98+0,5+285,27+2,1+6,26} = 0,718$$

Табличне значення для f_2 = N =8 та f_1 = n-1 = 1; G = 0,679.

Розраховане значення критерію Кохрена наближається до табличного, і для заданого рівня значущості α = 0,05 дисперсії є однорідними і їх можна усереднювати. Тоді дисперсія параметра оптимізації знаходиться за формулою:

$$S^2\{y\} = \frac{100,17+1,29+0,66+0,98+0,5+285,27+2,1+6,26}{8} = 49,654$$

Число ступенів свободи цієї дисперсії f_1 = N*(n-1) = 8*(2-1)=8.

Перевірку значущості коефіцієнтів регресії здійснюємо побудовою довірчих інтервалів. Для випадку, коли досліди матриці планування повторювались, дисперсія коефіцієнтів рівняння регресії буде обчислена за формулою:

$$S^2\{b_j\} = 49,654/(8*2) = 3,1;$$

А довірчий інтервал (при 90 % рівні значимості) буде розрахований за формулою:

$$\Delta b_j = 6,31 * \sqrt{3,1} = 11,12;$$

Коефіцієнти рівняння регресії вважаються значимими, якщо їх абсолютне значення більше за довірчий інтервал. Отже рівняння регресії має наступний вигляд:

$y = 146,02+19,28*x_1-18,41*x_2+21,84*x_2*x_3$

Представлене вище рівняння регресії побудоване у кодованому вигляді. Для отримання відповідного рівняння у явному вигляді, перевірки розрахунку та побудови діаграм виконаємо побудову кривої регресії міцності алюмінієво-мідного ливарного сплаву Al - 5% Cu за допомогою засобу "Аналіз даних" (FUNCRES.XLAM) програмного забезпечення Microsoft Excel 2007. Матриця планування експерименту, коефіцієнти рівняння регресії представлені у таблицях 3 – 7.

Таблиця 3 – Матриця експерименту 2^3.

№	X_1	X_2	X_3	Y_1	Y_2	$Y_{ср}$	Стандартне відхилення, %	Довірчий інтервал, %	Довірчий інтервал, МПа
1	0,6	750	4	175,159	161,005	168,082	10,0084	16,4636	16,5846
2	1,8	750	4	215,935	217,539	216,737	1,1342	1,8657	2,7351
3	0,6	950	4	112,039	110,891	111,465	0,8118	1,3353	2,4048
4	1,8	950	4	111,649	113,049	112,349	0,9899	1,6284	2,5791
5	0,6	750	8	103,001	104,005	103,503	0,7099	1,1678	2,3160
6	1,8	750	8	181,352	157,466	169,409	16,8900	27,7836	27,8555
7	0,6	950	8	122,825	124,875	123,85	1,4496	2,3845	3,1122
8	1,8	950	8	164,543	161,005	162,774	2,5017	4,1153	4,5756

Таблиця 4 – Вихідні данні для уведення у пакет регресійного аналізу програмного забезпечення Microsoft Excel 2007

Yср	**X_1**	**X_2**	**X_3**	**X_1*X_3**	**X_2*X_3**	**X_1*X_2**	**$Y_{p.}$**	**Y_{min}**	**Y_{max}**	**Результат потрапляння**
168,082	0,6	750	4	2,4	3000	450	168,082	151,4974	184,6666	Так
216,737	1,8	750	4	7,2	3000	1350	216,737	214,0019	219,4721	Так
111,465	0,6	950	4	2,4	3800	570	111,465	109,0602	113,8698	Так
112,349	1,8	950	4	7,2	3800	1710	112,349	109,7699	114,9281	Так
103,503	0,6	750	8	4,8	6000	450	103,503	101,1870	105,8190	Так
169,409	1,8	750	8	14,4	6000	1350	169,409	141,5535	197,2645	Так
123,85	0,6	950	8	4,8	7600	570	123,85	120,7378	126,9622	Так
162,774	1,8	950	8	14,4	7600	1710	162,774	158,1984	167,3496	Так

Таблиця 5 – Регресійна статистика

Багаторазовий R	0,997528427
R-квадрат	0,995062963
Нормований R-квадрат	0,965440743
Стандартна похибка	7,350021437
Спостереження	8

Таблиця 6 – Дисперсійний аналіз

	df	*SS*	*MS*	*F*	*Вагомість F*
Регресія	6	10888,3334	1814,722233	33,59177468	0,131312117
Залишок	1	54,02281513	54,02281513		
Разом	7	10942,35621			

Таблиця 7 – Коефіцієнти рівняння регресії та їх значимість

	Коефіцієнти	*Стандартна похибка*	*t-статистика*	*P-значення*
Y-перетин	721,867625	84,66494128	8,526169322	0,074326992
Змінна X1	129,9784375	39,27899028	3,309108421	0,186829085
Змінна X2	-0,6524225	0,097231644	-6,709981148	0,094183334
Змінна X3	-102,7983438	11,41991472	-9,001673506	0,070433585
Змінна X4	5,759479167	2,165520833	2,659627688	0,228954255
Змінна X5	0,109198125	0,012993125	8,404300351	0,075394813
Змінна X6	-0,155735417	0,043310417	-3,595795854	0,172682052

Отже у явному вигляді рівняння регресії міцності алюмінієво-мідного ливарного сплаву Al - 5% Cu має вигляд:

$$y = 721,9+129,98*x_1-0,65*x_2-102,8*x_3-0,156*x_1*x_2-5,76*x_1*x_3+0,11*x_2*x_3$$

Вихідні дані повного факторного експерименту при дослідженні відносного подовження сплаву Al - 5% Cu приведено в таблиці 8.

Таблиця 8 – Матриця експерименту 2^3 з двома паралельними дослідами

Номер досліду	Кількість ZrF_4, %	Температура витримки, °С	Час витримки, хв.	Відносне подовження, %			Дисперсія досліду
				δ_1	δ_2	$\delta_{ср.}$	
1	0,6	750	4	9,15	9,17	9,16	0,0002
2	1,8	750	4	7,13	7,2	7,165	0,00245
3	0,6	950	4	7,81	7,84	7,825	0,00045
4	1,8	950	4	9,4	9,6	9,5	0,02
5	0,6	750	8	2,3	2,4	2,35	0,005
6	1,8	750	8	7,5	8	7,75	0,125
7	0,6	950	8	5,9	6,1	6	0,02
8	1,8	950	8	8	9,17	8,585	0,684

Проводимо обчислення коефіцієнтів лінійної моделі. Складемо матрицю повного факторного експерименту з урахуванням ефекту взаємодії (табл. 9).

Таблиця 9 – Матриця 2^3 (фактори представлено у кодованих значеннях)

Номер досліду	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	y
1	+	+	-	-	-	-	+	+	9,16
2	+	-	+	-	-	+	-	+	7,165
3	+	-	-	-	+	+	+	-	7,825
4	+	+	+	-	+	-	-	-	9,5
5	+	+	-	+	-	+	-	-	2,35
6	+	-	+	+	-	-	+	-	7,75
7	+	-	-	+	+	-	-	+	6
8	+	+	+	+	+	+	+	+	8,585

$$b0 = \frac{9,16 + 7,17 + 7,8 + 9,5 + 2,35 + 7,75 + 6 + 8,59}{8} = 7,29$$

$$b_1 = \frac{9,16 - 7,17 - 7,8 + 9,5 + 2,35 - 7,75 - 6 + 8,59}{8} = 0,11$$

$$b_2 = \frac{-9,16 + 7,17 - 7,8 + 9,5 - 2,35 + 7,75 - 6 + 8,59}{8} = 0,96$$

$$b_3 = \frac{-9,16 - 7,17 - 7,8 - 9,5 + 2,35 + 7,75 + 6 + 8,59}{8} = -1,12$$

$$b_{12} = \frac{-9,16 - 7,17 + 7,8 + 9,5 - 2,35 - 7,75 + 6 + 8,59}{8} = 0,68$$

$$b_{13} = \frac{-9,16 + 7,17 + 7,8 - 9,5 + 2,35 - 7,75 - 6 + 8,59}{8} = -0,81$$

$$b_{23} = \frac{9,16 - 7,17 + 7,8 - 9,5 - 2,35 + 7,75 - 6 + 8,59}{8} = 1,04$$

$$b_{123} = \frac{9,16 + 7,17 - 7,8 - 9,5 - 2,35 - 7,75 + 6 + 8,59}{8} = 0,44$$

Отже поліном має вигляд:

$$\mathbf{y = 7,29+0,11*x_1-0,96*x_2-1,12*x_3+0,68*x_1*x_2-0,81*x_1*x_3+1,04*x_2*x_3+0,44*x_1*x_2*x_3}$$

Для кожного рядка матриці планування обчислюємо дисперсію досліду.

$$S_1^2 = \frac{(9,15-9,16)^2+(9,17-9,16)^2}{1} = 0,0002$$
$$S_2^2 = \frac{(7,13-7,165)^2+(7,2-7,165)^2}{1} = 0,00245$$
$$S_3^2 = \frac{(7,81-7,825)^2+(7,84-7,825)^2}{1} = 0,00045$$
$$S_4^2 = \frac{(9,4-9,5)^2+(9,6-9,5)^2}{1} = 0,02$$
$$S_5^2 = \frac{(2,3-2,35)^2+(2,4-2,35)^2}{1} = 0,005$$
$$S_6^2 = \frac{(7,5-7,75)^2+(8-7,75)^2}{1} = 0,125$$
$$S_7^2 = \frac{(5,9-6)^2+(6,1-6)^2}{1} = 0,02$$
$$S_8^2 = \frac{(8-8,585)^2+(9,17-8,585)^2}{1} = 0,684$$

Коли кількість повторних дослідів у кожному рядку однакова, однорідність дисперсій перевіряємо критерієм Кохрена, який є відношенням максимальної дисперсії до суми всіх дисперсій, тобто:

$$G_{f_1;f_2}^{p} = \frac{0,684}{0,0002+0,00245+0,00045+0,02+0,005+0,125+0,02+0,684} = 0,798$$

Табличне значення для f_2 = N =8 та f_1 = n-1 = 1; G = 0,679.

Розраховане значення критерію Кохрена наближається до табличного, і для заданого рівня значущості α = 0,05 дисперсії є однорідними і їх можна усереднювати. Тоді дисперсія параметра оптимізації знаходиться за формулою:

$$S^2\{y\} = \frac{0,0002+0,00245+0,00045+0,02+0,005+0,125+0,02+0,684}{8} = 0,107$$

Число ступенів свободи цієї дисперсії f_1 = N*(n-1) = 8*(2-1)=8.

Перевірку значущості коефіцієнтів регресії здійснюємо побудовою довірчих інтервалів. Для випадку, коли досліди матриці планування повторювались, дисперсія коефіцієнтів рівняння регресії буде обчислена за формулою:

$$S^2\{b_j\} = 0,107/(8*2) = 0,007;$$

А довірчий інтервал (при 90 % рівні значимості) буде розрахований за формулою:

$$\Delta b_j = 6,31*\sqrt{0,007} = 0,528;$$

Коефіцієнти рівняння регресії вважаються значимими, якщо їх абсолютне значення більше за довірчий інтервал. Отже рівняння регресії має наступний вигляд:

$$\mathbf{y = 7,29-0,96*x_2-1,12*x_3+0,68*x_1*x_2-0,81*x_1*x_3+1,04*x_2*x_3}$$

Представлене вище рівняння регресії побудоване у кодованому вигляді. Для отримання відповідного рівняння у явному вигляді, перевірки розрахунку та побудови діаграм виконаємо побудову кривої регресії відносного подовження алюмінієво-мідного ливарного сплаву Al - 5% Cu за допомогою засобу "Аналіз даних" (FUNCRES.XLAM) програмного забезпечення Microsoft Excel 2007. Матриця планування експерименту, коефіцієнти рівняння регресії представлені у таблицях 10 – 14.

Таблиця 10 – Матриця експерименту 2^3.

№	X_1	X_2	X_3	Y_1	Y_2	$Y_{ср.}$	Стандартне відхилення, %	Довірчий інтервал, %	Довірчий інтервал, %
1	0,6	750	4	9,15	9,17	9,16	0,0141	0,0233	2,0001
2	1,8	750	4	7,13	7,2	7,165	0,0495	0,0814	2,0017
3	0,6	950	4	7,81	7,84	7,825	0,0212	0,0349	2,0003
4	1,8	950	4	9,4	9,6	9,5	0,1414	0,2326	2,0135
5	0,6	750	8	2,3	2,4	2,35	0,0707	0,1163	2,0034
6	1,8	750	8	7,5	8	7,75	0,3536	0,5816	2,0828
7	0,6	950	8	5,9	6,1	6	0,1414	0,2326	2,0135
8	1,8	950	8	8	9,17	8,585	0,8273	1,3609	2,4191

Таблиця 11 – Вихідні данні для уведення у пакет регресійного аналізу програмного забезпечення Microsoft Excel 2007

$Y_{ср.}$	1	X_1	X_2	X_3	X_1*X_3	X_2*X_3	X_1*X_2	$Y_{р.}$	Y_{min}	Y_{max}	**Результат потрапляння**
9,16	1	0,6	750	4	2,4	3000	450	9,16	7,1599	11,1601	Так
7,165	1	1,8	750	4	7,2	3000	1350	7,165	5,1633	9,1667	Так
7,825	1	0,6	950	4	2,4	3800	570	7,825	5,8247	9,8253	Так
9,5	1	1,8	950	4	7,2	3800	1710	9,5	7,4865	11,5135	Так
2,35	1	0,6	750	8	4,8	6000	450	2,35	0,3466	4,3534	Так
7,75	1	1,8	750	8	14,4	6000	1350	7,75	5,6672	9,8328	Так
6	1	0,6	950	8	4,8	7600	570	6	3,9865	8,0135	Так
8,585	1	1,8	950	8	14,4	7600	1710	8,585	6,1659	11,0041	Так

Таблиця 12 – Регресійна статистика

Багаторазовий R	0,901439378
R-квадрат	0,812592952
Нормований R-квадрат	0,562716887
Стандартна похибка	1,512881839
Спостереження	8

Таблиця 13 – Дисперсійний аналіз

	df	*SS*	*MS*	*F*	*Вагомість F*
Регресія	4	29,7727125	7,443178125	3,251983949	0,180017424
Залишок	3	6,866434375	2,288811458		
Разом	7	36,63914688			

Таблиця 14 – Коефіцієнти рівняння регресії та їх значимість

	Коефіцієнти	*Стандартна похибка*	*t-статистика*	*P-значення*
Y-перетин	9,1384375	5,914042619	1,54520995	0,220007874
Змінна X1	-3,59375	2,819088861	-1,274791316	0,292156487
Змінна X2	0,00685625	0,005348845	1,281818776	0,28999144
Змінна X3	-1,5984375	0,598019055	-2,672887237	0,075504491
Змінна X4	0,865104167	0,445737086	1,940839551	0,14759038

Отже у явному вигляді рівняння регресії відносного подовження алюмінієво-мідного ливарного сплаву Al - 5% Cu має вигляд:

$$y = 9,13-3,59*x_1+0,007*x_2-1,598*x_3+0,865*x_1*x_3$$

Висновки:

Аналізуючи криві регресії визначено оптимальні параметри оброблення Al – 5 % Cu флюсами, що вміщують фторид цирконію, які складають – 0,6 ZrF_4 %, час витримування перед замішуванням 4 хв., температура розплаву – 750 °С для отримання максимальної міцності і 0,6 ZrF_4 %, час витримування перед замішуванням 4 хв., температура розплаву – 950 °С для отримання максимального відносного подовження у литому стані.

Бібліографічний опис

1. Мондольфо Л. Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов / Мондольфо Л. Ф.; [пер. с англ. Лещинер Л. Н., Сандлер В. С. и др.] – М.: Металлургия, 1979. – 639 с.: ил.
2. К. К. Пальоха. Організація експерименту: Навчальний посібник для студентів спеціальності "Композиційні та порошкові матеріали, покриття" / К. К. Пальоха – К.: ІЗМН, 1996 р. С. 136.
3.

References

1. Mondolfo L.F. Structure and properties of aluminum alloys / Mondolfo L.F.; [trans. with English L. N. Leshchyner, V. S. Sandler, etc.] - M.: Metallurgy, 1979. - 639 p.: ill.
2. K. K. Palhoha. Organization of the experiment: Study guide for students of the specialty "Composite and powder materials, coatings" / K.K. Paliokha - K.: IZMN, 1996, p. 136.

https://doi.org/10.34185/tpm.5.2022.08

УДК 669.18

Рубан В.О., Стоянов О.М.

Термодинаміка процесів дисоціації та відновлення оксидів металів в зоні горіння дуги при обробці на установці «ківш-піч»

Ruban V., Stoyanov O.

Thermodynamics of the processes of dissociation and reduction of metal oxides in the arc combustion zone during processing on the "bucket-furnace" installation

***Актуальність**: Розвиток технологій позапічної обробки сталі на установці «ківш-піч» (УКП) має велике значення для сучасного металургійного виробництва, оскільки це забезпечує більш широке застосування сталі в різних галузях промисловості. Проведення таких операцій як десульфурація, легування, модифікування та видалення неметалевих включень є важливими етапами в позапічній обробці сталі. Наукові дослідження в області термодинаміки процесів дисоціації та відновлення оксидів металів в зоні горіння дуги при обробці на установці «ківш-піч» є досить актуальними і мають суттєві значення для подальшого розвитку металургійної промисловості. Розуміння термодинамічних процесів дисоціації та відновлення оксидних матеріалів допомагає визначити оптимальні умови обробки, що може вплинути на якісні характеристики кінцевого продукту. Аналіз термодинамічних процесів допоможе оптимізувати параметри обробки, такі як температура, склад та витрати модифікаторів та легуючих матеріалів, енергії в процесі обробки сталі, що призводить до економічної вигоди для підприємств. Загалом, дослідження термодинаміки процесів дисоціації та відновлення оксидів в зоні горіння дуги при обробці на установці «ківш-піч» є важливим напрямком, який може принести значний внесок в загалом у процеси виробництва сталі так і вдосконалити технологію позапічної обробки сталі.*

***Наукова новизна**: Отримано дані, при високих значеннях температур в піделектродній зоні під час горіння дуги при подачі оксидів металів, зміни енергії Гіббса протікання реакцій дисоціації та відновлення.*

***Наукові та практичні результати:** Отримані дані результатів досліджень в подальшому дозволяють більш поглиблено досліджувати процес подачі легуючих та рафінуючих матеріалів через канал графітованого порожнистого електрода до зони горіння дуги під час обробки сталі на установці «ківш-піч».*

***Ключові слова:** установка «ківш-піч», термодинаміка, дисоціація, відновлення, металеві оксиди, енергія Гіббса.*

Relevance: The development of non-furnace steel processing technologies at the "bucket-furnace" installation is of great importance for modern metallurgical production, as it ensures a wider use of steel in various industries. Carrying out such operations as desulfurization, alloying, modification and removal of non-metallic inclusions are important stages in out-of-furnace steel processing. Scientific studies in the field of thermodynamics of the processes of dissiation and recovery of metal oxides in the arc combustion zone during processing on the "bucket-furnace" installation are quite relevant and have significant significance for the further development of the metallurgical industry. Understanding the thermodynamic processes of dissociation and reduction of oxide materials helps to determine the optimal processing conditions, which can affect the quality characteristics of the final product. Analysis of thermodynamic processes will help to optimize processing parameters such as temperature, composition and costs of modifiers and alloying materials, energy in the steel processing process, which leads to economic benefits for enterprises. In general, the study of the thermodynamics of the processes of dissociation and reduction of oxides in the arc combustion zone during processing at the "bucket-furnace" installation is an important direction that can make a significant contribution to the overall steel production processes and improve the technology of out-of-furnace steel processing.

Scientific novelty: Data were obtained, at high temperature values in the sub-electrode zone during arc burning when supplying metal oxides, on changes in the Gibbs energy of dissociation and reduction reactions.

Scientific and practical results: The obtained data of the research results allow further in-depth investigation of the process of supplying alloying and refining materials through the channel of the graphite hollow electrode to the arc combustion zone during steel processing at the "bucket-furnace" installation.

Key words: "bucket-furnace" installation, thermodynamics, dissociation, reduction, metal oxides, Gibbs energy.

Вступ

Термодинаміка процесів дисоціації та відновлення оксидів грає важливу роль у позапічній обробці сталі на установці «ківш-піч» (УКП). Металічні елементи в земній корі переважно зустрічаються у вигляді оксидів, сульфідів та карбідів. Під впливом високої температури неоксидні сполуки металів легко перетворюються на оксиди. Оскільки оксиди мають високу міцність, розривання зв'язку між металами та киснем через термічну дисоціацію, в більшості випадків є складним або потребує значних теплових затрат. Саме тому в промисловості метали отримують із руд шляхом відновлення. Можливість відновлення конкретного оксиду можна оцінити за зміною енергії Гіббса. Теоретично будь-який елемент, що утворює міцний оксид, може служити відновником для менш міцного оксиду.

Дисоціація оксидів відбувається, коли оксиди розкладаються на більш прості компоненти під впливом високих температур. Процес дисоціації залежить від реакційного рівняння, парціального тиску та умов в яких відбувається реакція.

Процес відновлення може відбуватися за участю реагентів, які мають вищу здатність до окиснення порівняно з оксиду металу. Термодинаміч-

Рубан В.О. – аспірант, УДУНТ, Стоянов О.М. – доцент УДУНТ

ний аспект дисоціації відображається через визначення стандартної енергії утворення (ΔG°) реакції. Якщо ΔG° менше нуля, то реакція здійснюється мимовільно при заданих умовах[1].

Оскільки важливим фактором, що впливає на процеси дисоціації та відновлення оксидів, є температура, то її збільшення сприяє протіканню дисоціації оксидів та покращує процеси відновлення. Додатково, наявність інших реагентів, може покращувати ефективність відновлення.

Отже, при позапічній обробці сталі на УКП де температура досягає дуже високих значень [2–4] та наявність відповідних реагентів відновників, створює сприятливі умови для дисоціації оксидів та можливості відновлення оксидів металів. Виходячи з вище зазначеного, дослідження термодинамічних процесів дисоціації та відновлення оксидів металів є актуальною задачею, що дозволить проводити процеси прямого відновлення, мікролегування модифікування сталі при позапічній обробці сталі на установці «ківш-піч».

Аналіз літературних даних

Позапічна обробка сталі на установці «ківш-піч» є невід'ємним етапом при виготовленні високоякісних марок сталі, яка включає в себе процес горіння дуги для нагрівання металу в ковші. Під час процесу горіння дуги відбуваються певні термодинамічні процеси, включаючи дисоціацію та відновлення оксидів. У зоні горіння дуги відбувається іонізація та дисоціація оксидів, які присутні в шлаці і металі або знаходяться в процесі плавлення. Висока температура та енергія дуги допомагають розщеплювати оксиди на їх складові частини, наприклад, монооксид заліза (FeO) може дисоціювати на залізо (Fe) та молекулярний кисень (O_2) [5, 6].

Авторами робіт [7, 8] проаналізовані дані отримані при виплавці низьковуглецевої сталі, розкисленої алюмінієм (LCAK), характерним дефектом є дрібні смуги та полони на поверхні тонколистового прокату. Однією з причин формування цих дефектів є наявність неоднорідностей, пов'язаних з оксидними неметалевими включеннями (скупчення частинок корунду або комплексних оксидів). Зазначено, що за рахунок зниження активності розчиненого кисню до 750 ppm відбувається зменшення імовірності формування дефектів.

Різними авторами вже було проаналізовано рівновагу деяких дво- і багатокомпонентних систем [9–12]. Авторами робіт [10, 11] проаналізовано термодинамічну імовірність утворення комплексних оксидних сполук з участю діоксиду кремнію, за обраною системою $CaO\text{-}MgO\text{-}Al_2O_3\text{-}SiO_2$. Аналіз даних показав, що при позапічній обробці сталі на УКП, за температури шлаку 1800–1900 К у стійкій формі існують тільки моно- і ортосилікати кальцію ($CaO\text{-}SiO_2$, $2CaO\text{-}SiO_2$), силікат ($3CaO\text{-}SiO_2$), форстерит ($2MgO\text{-}SiO_2$), муліт ($3Al_2O_3\text{-}2SiO_2$), діопсид ($CaO\text{-}MgO\text{-}SiO_2$), анортит ($CaO\text{-}Al_2O_3\text{-}2SiO_2$) та геленіт ($2CaO\text{-}Al_2O_3\text{-}SiO_2$). Визначено, що термодинамічно кращим буде утворення муліта та анортиту [12].

Авторами роботи [12] зазначено, що наявність у системі кремнію та його оксиду передбачає високу термодинамічну ймовірність протікання при високих температурах у зоні дуги реакції газифікації кремнезему:

$$(\mathrm{Si}O_2) + \{Si\} = 2\{SiO\} \quad (1)$$

Наявність у системі газоподібного монооксиду кремнію може призвести до зворотної реакції окисленості алюмінію в рідкому вигляді та пари інших відновлених металів при їх охолодженні навколишнім залізовуглецевим розплавом та інтенсивному переходу кремнію в метал, оскільки розділити продукти реакцій відновлення у газоподібному стані неможливо [1].

Для загущення шлаку та уповільнення переходу кремнію в метал під час позапічної обробки на УКП ВАТ «АМК» при швидкому зростанні його вмісту в сталі практикується введення магнезитового порошку в наведений рафінувальний шлак. В зоні горіння дуги, при температурі більше 2200 °С, кремній може бути відновником магнію. Отже, при введенні магнезиту в зону горіння дуги, кремній розчинений у металі, і відновлюваний з кремнезему буде витрачатися на відновлення магнію з оксиду магнію [1, 5, 13, 14].

Виходячи з вище зазначеного, при високих температурах за рахунок горіння електричної дуги в піделектродній зоні, в певній мірі покращуються процеси дисоціації та відновлення оксидів металів. Тому актуальною задачею є вибір системи оксидів та її термодинамічний аналіз при високих температурах під час горіння дуги в піделектродній зоні, на установці «ківш-піч».

Мета та задачі дослідження

Метою роботи є чисельне моделювання термодинамічних процесів дисоціації та відновлення оксидів металів в зоні горіння дуги при обробці сталі на установці «ківш-піч».

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

Визначити склад системи для термодинамічного аналізу;

Обрати реакції з визначеної системи хід протікання яких необхідно проаналізувати;

Визначити величину зміни енергії Гіббса обраних реакцій дисоціації і відновлення та можливість їх мимовільного протікання в зоні горіння дуги;

Визначення температур початку дисоціації і відновлення оксидів обраної системи.

Матеріали та методи чисельного моделювання термодинаміки процесів дисоціації та відновлення оксидів в зоні горіння дуги.

Під час позапічної обробки металу на установці «ківш-піч» однією з основних задач при виробництві якісних марок сталі є здійснення процесів ра-

фінування, мікролегування, модифікування та видалення неметалевих включень (НВ). Проведення цих операцій зазвичай вимагає використання дорогих реагентів, зокрема чисті метали та феросплави на їх основі (кальцій, магній, силіцій, титан, хром на інші). Доцільною альтернативою є використання оксидів цих металів, які теоретично у піделектродній зоні відновлюватимуться до чистих елементів. Передбачено подачу цих матеріалів каналом графітованого порожнистого електроду в потоці нейтрального газу. Процес одержання чистого компоненту може відбуватися як за рахунок дисоціації, так і за рахунок відновлення металами більш спорідненими до кисню.

Зважаючи на сказане вище, для подальшого аналізу було обрано наступні оксиди: Al_2O_3, CaO, MgO, SiO_2, MnO, TiO_2, Cr_2O_3, FeO. Далі наведено реакції дисоціації цих оксидів:

$$\frac{1}{2}\mathrm{Al}_2O_3 = Al + \frac{3}{4}O_2, \quad (2)$$

$$\mathrm{Ca}O = Ca + \frac{1}{2}O_2, \quad (3)$$

$$\mathrm{Mg}O = Mg + \frac{1}{2}O_2, \quad (4)$$

$$\mathrm{Si}\,O_2 = Si + O_2, \quad (5)$$

$$\mathrm{Mn}O = Mn + \frac{1}{2}O_2, \quad (6)$$

$$\mathrm{Ti}O_2 = Ti + O_2, \quad (7)$$

$$\frac{1}{2}Cr_2O_3 = Cr + \frac{3}{4}O_2, \quad (8)$$

$$\mathrm{Fe}O = Fe + \frac{1}{2}O_2. \quad (9)$$

У якості відновників, для регулювання окисленості шлаку, було прийнято вуглець (С) і алюміній (Al). Реакції відновлення монооксиду заліза цими компонентами вказані нижче:

$$3\mathrm{Fe}O + 2Al = 3Fe + Al_2O_3, \quad (10)$$

$$\mathrm{Fe}O + C = Fe + CO, \quad (11)$$

Алюміній і вуглець можуть слугувати відновниками монооксиду заліза, якщо її хімічне спорідненя до кисню більше, ніж у металу. Як відомо, мірою споріднення до кисню є змінювання вільної енергії в реакції утворення оксиду з елементів [5].

Тому у разі вибору відновника необхідно порівняти ΔG° для реакцій (9) та (12) і (9) та (2).

$$CO = C + \frac{1}{2}O_2, \quad (12)$$

Наступним етапом за обраними системами було проведено чисельне моделювання аналізу термодинаміки реакцій дисоціації і відновлення оксидів. Розрахунки проводились в програмному продукті «HSChemystry», а саме в розділі «Reaction Equations».

Далі було задано та урівняно рівняння реакцій, задано температурний діапазон протікання реакцій та крок розрахунку. Крок розрахунку обрано 100 °С, що дозволяє отримувати достатньо інформації на всьому проміжку інтервалу температур під час позапічної обробки сталі. Температурний діапазон відповідає максимальним значенням температури в піделектродній зоні під час позапічної обробки сталі на установці «ківш-піч». Розрахунок базується на визначені зміни енергії Гіббса (ΔG°) під час протікання реакцій дисоціації або відновлення в зазначеному температурному діапазоні 0–7000 °С [2].

Результати дослідження термодинаміки процесів дисоціації та відновлення оксидів.

За результатами проведеного чисельного моделювання отримані дані щодо зміни енергії Гіббса (ΔG°) з ростом температури в піделектродній зоні під час горіння дуги. По отриманим даним побудовано графік залежності, який зображено на рис. 1.

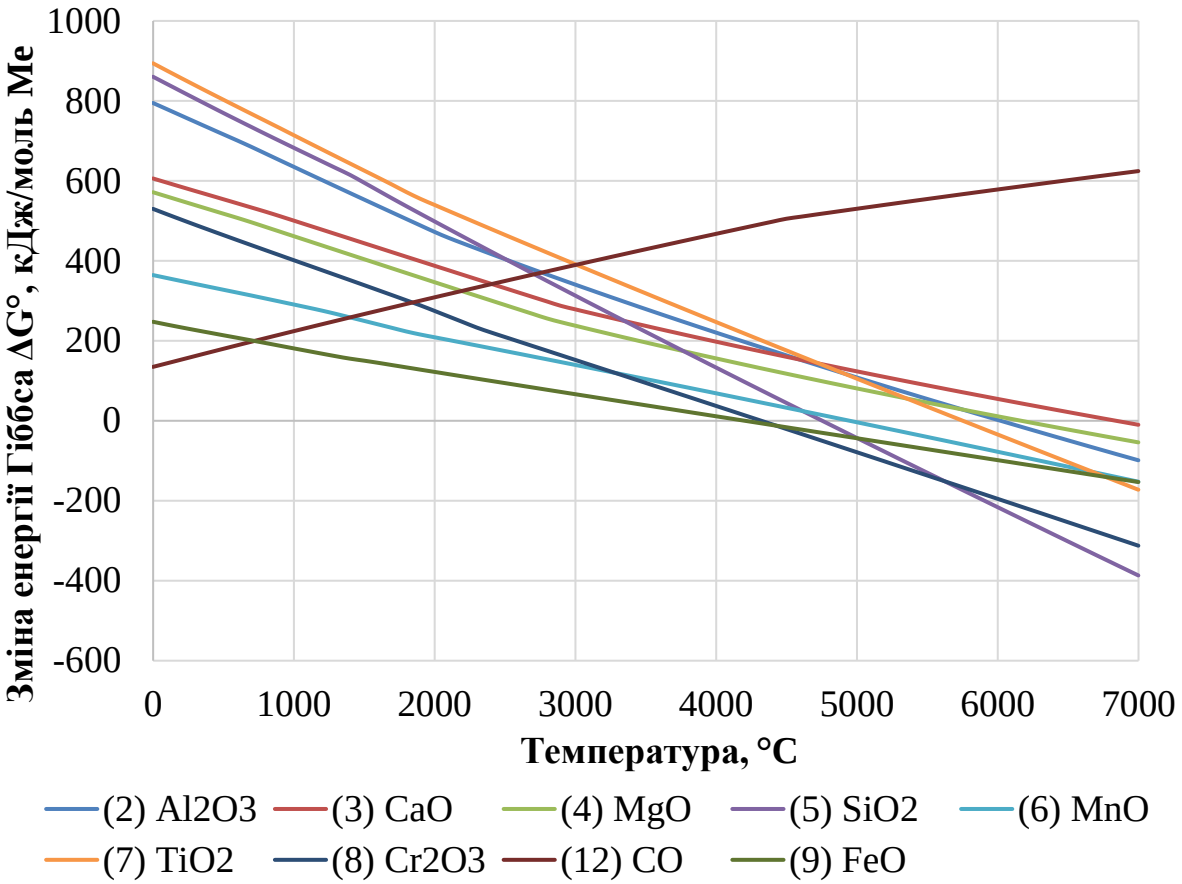


Рисунок 1 – Зміна енергії Гіббса реакцій дисоціації металевих оксидів в залежності від температури

Відповідно до теорії О.О. Байкова процес відновлення відбувається в двох одночасно здійснюваних перетвореннях: первинної реакції дисоціації оксидів з виділенням кисню та послідуючої реакції виділеного кисню з відновником. Роль відновника зводиться до видалення кисню з газової фази і підтримання його на такому рівні, при якому можлива дисоціація оксиду. Проаналізувавши рисунок 1, можна сказати, що вуглець виступає у якості відновника для всіх металевих оксидів. Наприклад, оксиди кальцію і магнію мають рівноважну температуру початку протікання реакції за участі вуглецю 2180 °С і 2300 °С відповідно, оскільки це є точками перетину кривих. Судячи з даного графіку найбільш міцними металевими оксидами, за температур системи «метал-шлак» у піделектродній зоні [15], є оксид титану, діоксид кремнію, оксид алюмінію, оксид кальцію і оксид магнію. Також варто зазначити, що мимовільне протікання реакцій дисоціації оксидів бере свій початок за температури 4050 °С. Таким чином підтверджено мимовільне протікання реакцій в піделектродній зоні під час горіння дуги.

Виходячи із зазначеного вище, за рівняннями реакцій відновлення (10) і (11) було побудовано графік залежності зміни енергії Гіббса монооксиду заліза (FeO) від температури, за участю таких відновників як вуглець (С) та алюміній (Al). Дану залежність зображено на рисунку 2.

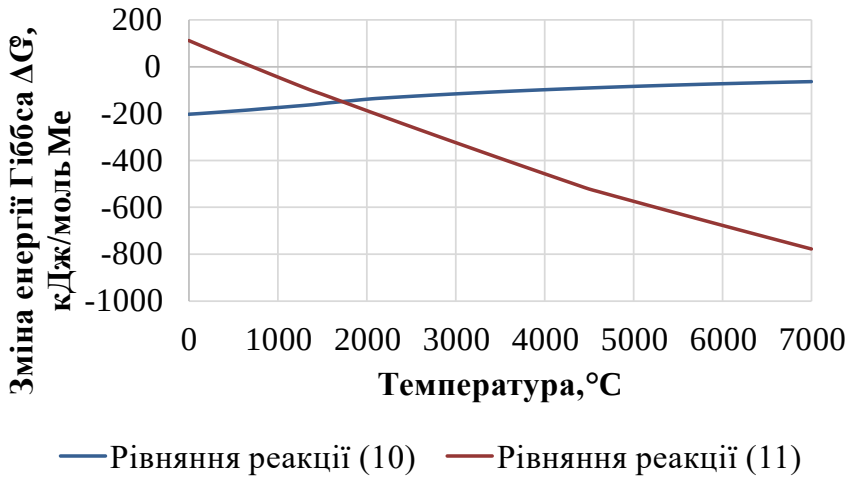


Рисунок 2 – Зміна енергії Гіббса реакцій відновлення монооксиду заліза (FeO) за участі вуглецю (C) і алюмінію (Al) в залежності від температури

Відповідно до зміни енергії Гіббса, початок протікання реакції відновлення монооксиду заліза (11) вуглецем відбувається при температурі близько 800 °C, тоді як в діапазоні температур 3000 – 7000 °C в зоні горіння дуги ΔG° сягає значень від –270 до –690 кДж/моль Me. Це має позитивний вплив на процес розкислення шлаку та десульфурацію сталі під час позапічної обробки на установці «ківш-піч».

Стосовно рівняння реакції (10), в якій монооксид заліза відновлюється за допомогою алюмінію, спостерігається зміна енергії Гіббса постійно менше нуля у всьому діапазоні температур від 0 до 7000 °C. Дане спостереження свідчить про можливість мимовільного протікання реакції за температур обробки сталі на установці «ківш-піч». Це є наслідком більшої спорідненості алюмінію до кисню у порівнянні із залізом. У якості розкислювача шлаку Алюміній є ефективнішим лише за низьких температур у порівнянні з вуглецем, оскільки за температур горіння дуги ΔG° коливається від –130 кДж/моль Me при температурі 3000 °C, до –75 кДж/моль Me при 7000 °C.

На рисунку 3 зображено порівняльну характеристику початку протікання реакцій відновлення і дисоціації оксидів металів.

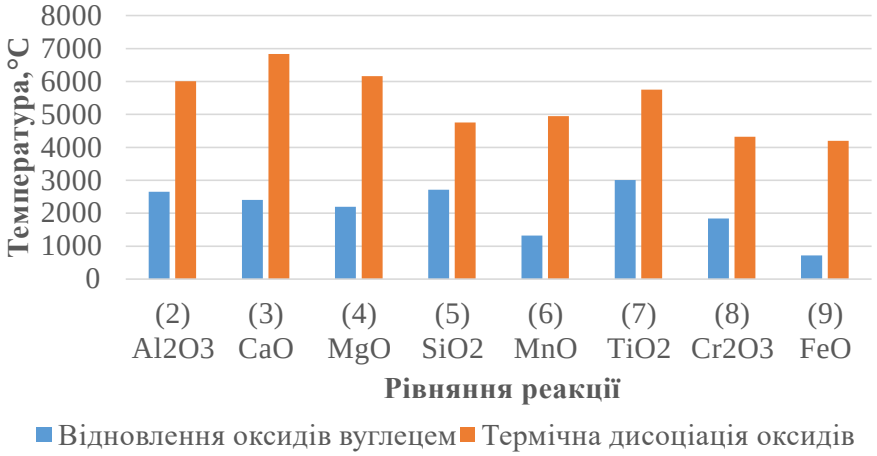


Рисунок 2 – Порівняння рівноважної температури початку протікання реакцій відновлення і дисоціації оксидів металу

За отриманими даними, для порівняння температури початку протікання реакції термічної дисоціації оксидів металів з відновленням оксидів вуглецем, побудовано дану гістограму, яка свідчить про те, що термічна дисоціація обраних оксидів має початкову рівноважну температуру від 4000–7000°C, що входить в проміжок температур в піделектродній зоні. У той час як відновлення оксидів металів вуглецем починається у діапазоні температур від 800 °C до 3000 °C.

Висновки.

Проведений термодинамічний аналіз процесів дисоціації та відновлення оксидів металів в зоні горіння дуги при обробці сталі на УКП, вказав на принципову можливість дисоціації обраних оксидів до температури 7000 °C. Тоді як відновлення ок-

сидів металів відбувається при більш низьких температурах, зокрема не тільки в піделектродній зоні під час горіння дуги.

Отримано дані зміни енергії Гіббса протікання реакцій відновлення монооксиду заліза за допомогою відновників вуглецю та алюмінію в діапазоні температури горіння дуги від 3000 – 7000 °С, які склали від –270 до –690 кДж/моль Ме при використанні у якості відновника вуглецю та від –130 до –75 кДж/моль Ме відповідно алюмінію.

Отримані дані дозволять сформулювати вимоги щодо розробки технології відновлення або дисоціації оксидів металів які будуть подаватися каналом графітованого порожнистого електрода в піделектродну зону під час горіння дуги при обробці сталі на установці «ківш-піч».

Перелік літературних посилань

1. Бережной, А.С. Многокомпонентные системы окислов: Учебник / А.С. Бережной. – Киев: «Наукова думка», 1970. – 544 с.
2. Toulouevski, Y.N. Innovation in electric arc furnaces. Scientific basis for selection / Y.N. Toulouevski, I.Y. Zinurov. – New York Dordrecht London: Springer, Heidelberg, 2010. – 282 с.
3. Переворочаев, Н.М. Совершенствование электрических и технологических режимов доводки металла на установке ковш-печь / Н.М. Переворочаев, Б.П. Крикунов // Металл и литьё Украины. – 2011. – №9–10. – С. 39–45.
4. Воденніков, С.А. Теорія та технологія електросталеплавильного виробництва: Навчальний посібник з грифом МОНУ / С.А. Воденніков, Ю.П. Галицький, О.С. Воденнікова. – Запоріжжя: Видавництво Запорізької державної інженерної академії, 2010. – 246 с.
5. Охотський, В.Б. Теорія металургійних процесів: Підручник / В.Б. Охотський, О.Л. Костьолов, В. К. Сімонов та ін. – Київ: ІЗМН, 1997. –512 с.
6. Казачков Е.А. Расчеты по теории металлургических процессов: учебное пособие для вузов / Казачков Е.А.. – М.: Металлургия, 1988. – 288с.
7. Lifeng Zhang. State of the Art in Evaluation and Control of Steel Cleanliness / Lifeng Zhang, Brian G. Thoma // ISIJ International – 2003. – V. 43. – № 3. – P. 271–291.
8. Sanam, V. Reduction of Slivers due to Non-Metallic Inclusion in Continuous Casting / V. Sanam, P. K. Patra, S. Siddabathula, R. Das, V. Usharani // Materials Science & Technology 2009. October 25–29, 2009: Pittsburgh, PA. – AIST Steel Properties Applications Conference Proceedings. – 2009. – P. 235-246.
9. Jacob, K.T. Phase Equilibria in the System $CaO-Al_2O_3-CoO$ and Gibbs Energy of Formation of $Ca_3CoAl_4O_{10}$ / K.T. Jacob, Ch. Shekhar, G.M. Kale // Phase Equilibria and Diffusion. – 2009. – V. 30. – № 1. – P. 2–11.
10. Низяев К.Г., Бойченко Б.М. // Металлургия и горнорудная промышленность. – 2002 – № 7 – С. 23–25.
11. Низяев К.Г. Термодинамические закономерности восстановления магнезита под слоем жидкого металла // Труды IX международной научно-технической конференции «Теория и практика кислородноконвертерного процесса». - Днепропетровск: ГМетАУ – 1998 – С. 26–27.
12. Кузнецов, Д. Ю. Исследование влияния термодинамических параметров шлаковой системы на содержание кремния в малоуглеродистой стали / Д. Ю. Кузнецов, Д. Б. Васильев, С. В. Куберский // Сб. науч. тр. ДонГТУ. – 2007. – Вып. 24. – С. 299–305.
13. Самарина, А.М. Сталеплавильное производство. Справочник, т.1 / Под ред. А.М. Самарина. – М.: Металлургия, 1964. – 527 с.
14. Elliott, J. F. Thermochemistry for Steelmaking. Vol. I & II. / J.F. Elliott, M. Gleiser & V. Ramakrishna – London: Addison-Wesley, 1960–1964. – 548 P.
15. Ruban, V. Determining changes in the temperature field of a graphitized hollow electrode during metal processing periods in ladle-furnace / V. Ruban, O. Stoianov, K. Niziaiev, Y. Synehin // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – №2. – P. 109 – 115. doi: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.230002

ЗМІСТ

ПІНЧУК В.Л., САМСОНЕНКО А.А., БОБУХ О.С., КУЗЬМІНА О.М., КОРНЄВ С.В., ФРОЛОВ Я.В.

Дослідження впливу параметрів процесу гарячого пресування корозійностійких труб на зношування матричних кілець за допомогою комп'ютерного моделювання 5

ДОБРОВ І.В., СЕМИЧЕВ А.В.

Розрахунково-аналітичний метод визначення кінематичних та енергосилових параметрів кривошипно-повзунного механізму (Повідомлення 1. Кінематика) 16

ЛЮТИЙ Р.В., ТИШКОВЕЦЬ М.В., ОСИПЕНКО І.О., МИСЛИВЧЕНКО О.М.

Технологічний рециклінг стрижневої суміші на основі фосфатів натрію 22

МАЛИЙ Е.І., ЧЕМЕРИНСЬКИЙ М.С.

Дослідження особливостей модифікації електродного пеку фенолформальдепідною смолою 29

БІЛОДІДЕНКО С. В., ГАНУШ В. І., ІЖЕВСЬКИЙ Є. А., КОСТРИЦЯ С. А.

Формування режиму навантаження для прогнозування ресурсу колон гідравлічних пресів для виробництва залізничних коліс 36

ГОЛУБ І. В.

Дослідження поведінки шлакової системи при обробці металу газовою сумішшю з підвищеним вмістом азоту 46

ІВАНЧЕНКО Д. В.

Механічні властивості модельного алюмінієво-мідного ливарного сплаву Al - 5% Cu зміцненого фторидом цирконію 50

РУБАН В.О., СТОЯНОВ О.М.

Термодинаміка процесів дисоціації та відновлення оксидів металів в зоні горіння дуги при обробці на установці «ківш-піч» 57

ЗМІСТ 63

CONTENT 64

CONTENT

_Toc147224705

PINCHUK V., SAMSONENKO A., BOBUKH O., KUZMINA O., KORNIEV S., FROLOV YA.

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE HOT EXTRUSION PARAMETERS OF CORROSION-RESISTANT PIPES ON THE MATRIX RINGS WEAR BY COMPUTER SIMULATION 5

LIUTYI R., TYSHKOVETS M., OSYPENKO I., MYSLYVCHENKO A.

TECHNOLOGICAL RECYCLING OF CORE MIXTURE BASED ON SODIUM PHOSPHATES 22

MALYI E.I., CHEMERINSKIY M.S.

RESEARCH OF FEATURES MODIFICATION FOR ELECTRODE PITCH BY PHENOL-FORMALDEHYDE RESIN 29

BELODEDENKO S., HANUSH V., IZHEVSKYI Y., KOSTRITSA S.

FORMATION OF THE LOADING FOR PREDICTING THE LIFETIME OF THE HYDRAULIC PRESSES COLUMNS FOR THE RAILWAY WHEELS PRODUCTION 36

HOLUB I. V.

STUDY OF SLAG SYSTEM DURING METAL TREATMENT WITH GAS MIXTURE WITH HIGH NITROGEN CONTENT 46

IVANCHENKO D.

MECHANICAL PROPERTIES OF AN ALUMINUM-COPPER MODEL CAST ALLOY AL - 5% CU STRENGTHENED WITH ZIRCONIUM FLUORIDE. 50

RUBAN V., STOYANOV O.

THERMODYNAMICS OF THE PROCESSES OF DISSOCIATION AND REDUCTION OF METAL OXIDES IN THE ARC COMBUSTION ZONE DURING PROCESSING ON THE "BUCKET-FURNACE" INSTALLATION 57

ЗМІСТ 63

CONTENT 64