

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

БІЛИЙ ОЛЕКСАНДР ПЕТРОВИЧ



УДК 621.742.4

**ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ КЕРОВАНОГО
ТЕПЛООБМІНУ ЕКРАНУВАННЯМ ФОРМИ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ
ЧАВУННИХ ПРОКАТНИХ ВАЛКІВ**

Спеціальність 05.16.04 – Ливарне виробництво

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпро – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національній металургійній академії України Міністерства освіти і науки України, м. Дніпро

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор
Хричиков Валерій Євгенович,
завідувач кафедри ливарного виробництва
Національної металургійної академії України,
м. Дніпро.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Наумик Валерій Владиленович,
проректор з наукової роботи та міжнародної
діяльності Запорізького національного технічного
університету, м. Запоріжжя;

кандидат технічних наук,
Стороженко Світлана Анатоліївна,
Дніпровський державний технічний
університет, доцент кафедри металургії
чорних металів імені професора
В.І. Логінова, м. Кам'янське.

Захист відбудеться «16» _____ 10 _____ 2020 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.084.03 в Національній металургійній академії України за адресою: 49600, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національної металургійної академії України за адресою: 49600, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4.

Автореферат розісланий « 08 » _____ 09 _____ 2020 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 08.084.03,
д. т. н., проф.



Л.В. Камкіна

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Виробництво металопрокату в Україні досягло 18 млн. т, а основна його частина експортується за кордон. Розширення асортименту продукції, посилення конкуренції на світовому ринку металопродукції потребує не лише підвищення якості, надійності і довговічності прокатних валків, але і зниження собівартості їх виробництва. Промислові підприємства України використовують різні типи валків: листо- сорто- і трубопрокатні; бумаго- і картоноробні; гумотехнічні; мукомольні, маслобойні і фарботерочні, які відливають з чавуну (>90%) і заевтектоїдної сталі, а частка кованих валків складає ~5%.

Згідно діючим технічним умовам (ТУ У 28.9-001877375-106:2018 Валки чавунні і сталеві для гарячого прокатування металів) з 63 типів валків 23 (37%) належать до валків з вибіленим робочим шаром. Важливим показником зносостійкості і експлуатаційної надійності таких валків є твердість робочого шару бочки, його глибина та величина залишкових напружень у вибіленому шарі. В остатньому випадку величину залишкових напружень у вибіленому шарі валків зменшують за рахунок проведення релаксаційного відпалу або довготривалого природнього старіння. Виходячи з умов короткостроковості поставок чавунних валків на підприємства-споживачі на сьогодні зниження напружень за рахунок термообробки приводить до підвищення їх собівартості на 35...45% і, відповідно, зниження їх конкурентоздатності.

Нині підвищення якості литих чавунних валків, як правило, досягають шляхом їх модифікування і легування, а зниження собівартості – шляхом скорочення і оптимізації циклу їх термічної обробки. Питаннями модифікування і легування, теплофізичної дії на метали, що твердіють у формі, і сплави займалися багато вчених і дослідників: А.Є. Кривошеєв, Л.С. Рудницький, М.П. Котешов, Н.Г. Гіршович, К.П. Бунін, А.І. Вейнік, Ю.Н. Таран-Жовнір та ін.

Проте, незважаючи на численні дослідження на сьогодні відсутня повнота інформації про властивості і можливості для валкових чавунів модифікаторів, що містять рідкоземельні метали (РЗМ), комплексної дії на структуру чавунів модифікування РЗМ і легування, відсутні дані про результати і можливості теплофізичного впливу на структуру і якість чавунних валків і таке інше, що є одним з основних важелів, у підвищенні якості валків та зниження їх собівартості, у тому числі і за рахунок зниження залишкових напружень у валках без проведення додаткової термічної обробки - відпалу.

Тому робота, що спрямована на вивчення і розробку науково обґрунтованих технологічних основ процесу лиття сортопрокатних чавунних валків зі зниженим рівнем залишкових напружень у вибіленому шарі шляхом модифікування РЗМ, легування, а також використання керованого теплообміну екрануванням форми, є актуальною, а вирішувана в роботі задача має важливе наукове і прикладне значення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Виконання дисертаційної роботи пов'язано з тематичними планами держбюджетних науково-дослідних робіт Національної металургійної академії України (тема

Г522G10003 «Розробка новітньої технології твердофазного гідродинамічного модифікування сплавів на основі заліза з використанням методів фрактального оцінювання» № ДР 011U003264; тема «Наукові і технологічні основи виробництва керамічних оболонкових форм з використанням вітчизняного рідкого скла для литва за витоплюваними моделями» № ДР 0117U002348). Автор був виконавцем цих робіт.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є обґрунтування умов формування та реалізація зниження залишкових напружень у вибіленому шарі чавунних валків виконання СПХН-60 без їх термічної обробки та природного старіння шляхом керованого теплообміну за рахунок екранування комбінованої ливарної форми.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані наступні задачі:

1. За результатами аналізу сучасних технологій виробництва сортопрокатних валків, науково-технічної та патентної літератури провести аналіз стану питання, визначити основні напрями вирішення поставленої у роботі задачі.

2. Встановити кількісний вплив структурних складників і товщини вибіленого шару чавуну в бочках сортопрокатних валків виконання СПХН-60 на величину залишкових напружень в них, у тому числі і при зовнішньому теплоізолюванні (екрануванні) валкової комбінованої ливарної форми.

3. Встановити мінімально припустиму величину теплоакумуючої здатності матеріалу форми, яку використовують для нижньої шийки валка, що забезпечує послідовність затвердіння чавуну в системі нижня шийка – бочка.

4. Встановити залежність часу початку теплоізолювання (екранування) зовнішньої поверхні ливарної форми від діаметра бочки валка у межах від 100 до 800 мм.

5. Встановити закономірності впливу теплоізолювання зовнішньої поверхні ливарної форми на швидкість охолодження валків, розподіл хімічних елементів, мікроструктуру валкових чавунів та величину залишкових напружень.

6. Для чавунних сортопрокатних валків встановити закономірності комплексного впливу зовнішнього теплоізолювання, радіальних розмірних параметрів форми для валків з діаметром бочки від 300 до 500 мм та величин коефіцієнтів теплоакумуючої здатності матеріалів комбінованих ливарних форм на вірогідність виникнення усадкових раковин у нижніх шийках валків.

7. Встановити можливість зняття залишкових напружень при відпалюванні валків за рахунок позапічного модифікування чавуну механічною сумішшю комплексного модифікатора на основі РЗМ та гадолінієвого концентрату.

8. Результати роботи впровадити в навчальний процес відповідної спеціальності Національної металургійної академії України.

Об'єкт дослідження. Процес формування литих чавунних прокатних валків у комбінованій ливарній формі.

Предмет дослідження. Закономірності впливу модифікування та легування чавуну, умов тепловідведення при охолодженні валків на структуру і залишкові напруження в литому стані.

Методи дослідження. В роботі використані стандартні методи і загальноприйняті методики, в числі яких: методи визначення хімічного складу та механічних властивостей чавунів, металографічні дослідження і статистична обробка експериментальних даних. Для визначення величин залишкових напружень використовували результати вимірювання коерцитивної сили чавуну. Температурні поля досліджуваних валків визначали за результатами термічного аналізу, а також комп'ютерного моделювання з використанням програми LVMFlow. Виробничі дослідження виконані в умовах АТ «Дніпропетровський завод прокатних валків» (м. Дніпро).

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

Наукове значення роботи полягає в подальшому розвитку теоретичних уявлень процесів формування виливків і керування затвердінням чавунних прокатних валків в комбінованих ливарних формах.

1. *Вперше встановлено кількісний комплексний вплив фазового складу і товщини вибіленого робочого шару чавуну в бочках прокатних валків на величину залишкових напружень, що обумовлено зменшенням перепаду температури між центром та поверхнею бочки валка, який досягають за рахунок керованого зовнішнього тепловідводу від бочки валка.*

Раніше такі дані були не відомі. Використання цих даних дозволить не тільки прогнозувати величину залишкових напруг в бочці валків, але і на 35...45% знизити собівартість їх виробництва за рахунок введення валків в експлуатація без їх термічної обробки.

2. *Вперше для прокатних валків з вибіленим робочим шаром встановлено закономірності комплексного впливу зовнішнього теплоізолювання, радіальних розмірних параметрів комбінованої ливарної форми та величин коефіцієнтів теплоакумуючої здатності її матеріалів на вірогідність виникнення усадкової раковини в нижніх шийках валків, що залежить від співвідношення часу затвердіння чавуну в бочці та нижній шийці.*

Такі закономірності раніше відомі не були. Використання цих даних, зокрема, для валків з діаметром бочки від 300 до 500 мм, дозволить не тільки прогнозувати ймовірність утворення усадочних дефектів неприпустимих розмірів в сполученні бочки і нижньої шийки валка, а й розробити технологічну ливарну технологію виробництва сортопрокатних валків в досліджених межах їх параметрів з теплоізолюванням ливарної форми.

3. *Вперше встановлена тривалість охолодження прокатних валків з бочкою діаметром 200...800 мм у чавунному кокілі з зовнішнім діаметром 500...1250 мм до початку процесу екранування комбінованої ливарної форми, що залежить від часу досягнення в шарі вибіленого чавуну товщиною 20...50 мм температури евтектоїдного перетворення.*

Раніше такі дані були відомі для декількох точок робочого шару окремих розмірів валків у місці розташування термопар, але відсутні для всього діапазону типорозмірів валків. Отримані залежності дозволили встановити час початку теплової ізоляції кокілю від навколишнього середовища, зменшити залишкові ливарні напруження у валках і уникнути проведення релаксаційного відпалу.

4. Вперше встановлено збільшення здатності до зняття залишкових напружень доевтектичного чавуну після відпалу, розплав якого був модифікований у ковші механічною сумішшю комплексного модифікатора на основі рідкісноземельних елементів та гадолінієвого концентрату у співвідношенні 10:1 при витраті суміші у кількості 0,54...0,77 мас.%, що пов'язано зі збільшенням дисперсності перліту у структурі чавуну робочого шару валків.

Раніше така закономірність була не відома. Використання цих даних дозволить підвищити експлуатаційну надійність і міцність сортопрокатних валків після проведення їх релаксаційного відпалу при температурі 600 ± 5 °C за рахунок зменшення залишкових ливарних напруг в сортопрокатних валках на 70,4 ... 75,9% від їх початкової величини.

Практичне значення одержаних результатів. За результатами виконаних досліджень розроблено рекомендації, щодо технології теплоізолювання ливарних форм сортопрокатних валків виконання СПХН-60, виконання яких дозволяє зменшити рівень залишкових напружень в литому валку до рівня термічно обробленого валка. Розробка пройшла дослідно–промислово перевірку на АТ «ДЗПВ» (м. Дніпро) з позитивним результатом (Акт від 07.02.2020 р.).

Розроблено параметричні критерії, використання яких дозволяє на стадії проектування ливарної форми для сортопрокатних валків з діаметром бочки від 300 до 500 мм здійснювати прогноз ймовірності виникнення усадочної раковини в сполученні бочки та нижній шийці валка. Розроблено склади модифікаторів, використання яких дозволяє підвищити механічні властивості валкового чавуну і зменшити величину залишкових напружень після відпалу валків в 1,56 ... 1,76 разів.

Результати досліджень впроваджено в навчальний процес Національної металургійної академії України і використовуються при виконанні випускних кваліфікаційних робіт бакалаврів та магістрів (Акт від 03.02.2020 р.).

Особистий внесок здобувача. Всі наукові результати, отримані в дисертації, базуються на дослідженнях, проведених особисто здобувачем. Публікації відображають результати досліджень, виконаних здобувачем. У дисертації не використані ідеї співробітників, які сприяли виконанню роботи. Здобувач безпосередньо розробив технологічні та теоретичні основи виготовлення прокатних валків, провів експерименти, аналіз та обробку отриманих даних. Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих в співавторстві (в порядку, наведеному у списку публікацій здобувача):

- досліджено вплив первинного та вторинного модифікування на здатність до зняття залишкових напружень при релаксаційному відпалі чавунних прокатних валків [7, 9, 12];

- досліджено вплив регульованого охолодження комбінованої ливарної форми на рівень залишкових ливарних напружень в чавунних прокатних валках [1, 5, 10, 16];

- досліджено вплив повторного нагрівання та охолодження чавунів модифікованих РЗМ на їх структуру [2];

- досліджено вплив комплексного модифікування і легування на структуру і фізико-механічні властивості валкового чавуну [3];
- досліджено вплив уповільнення охолодження чавунного прокатного валка після кристалізації робочого шару на мікроструктуру по глибині бочки сортопрокатного валка [4];
- адаптація комп'ютерного моделювання процесу затвердіння виливків [6, 13, 14, 17];
- досліджено вплив модифікування та легування на підвищення міцності, термостійкості та зносостійкості чавуну [8, 11, 15].

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи були представлені та обговорені на міжнародних науково-технічних та науково-практичних конференціях: XIII Міжнародної науково-технічної конференції «Неметалеві вкраплення і гази у ливарних сплавах» (Запоріжжя, 2012 р.); 11th International symposium of croatian metallurgical society «Materials and metallurgy» (Šibenik, 2014); VII Міжнародної науково-технічної конференції «Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2016» (Київ, 2016 р.); VI Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективні технології, матеріали та обладнання у ливарному виробництві» (Краматорськ, 2017 р.); 13th International symposium of croatian metallurgical society «Materials and metallurgy» (Šibenik, 2018).

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи викладені у 17 друкованих працях, в тому числі: у 7 фахових виданнях, з яких 1 входить до міжнародних наукометричних баз та 2 у закордоннім виданні, у 5 патентах України на винахід; у 5 тезах доповідей на міжнародних науково-технічних та науково-практичних конференціях.

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, основної частини – чотирьох розділів з висновками до кожного з них, загальних висновків, списку використаних джерел з 116 найменувань і 3 додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи викладено на 166 сторінках загального машинописного тексту, містить 50 рисунків і 32 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано її мету та завдання досліджень, викладено інформацію щодо об'єкту, предмету та методу досліджень, наукову новизну та практичне значення, а також відомості щодо особистого внеску здобувача та апробації отриманих результатів та структури дисертації та дана оцінка можливості їх реалізації у виробництві сортопрокатних валків.

У **першому розділі** проаналізовано якість та вимоги до сучасних сортопрокатних чавунних валків, способів попередження виникнення усадкових дефектів та напружень у виливках.

Встановлено, що для сортопрокатних валків з числа відомих способів зменшення їх напруженого стану найбільш придатним є зниження швидкості їх охолодження в ливарних формах. При цьому для управління кінетикою

твердіння сортопрокатних валків, що формуються у комбінованій ливарній формі, найбільш прийнятним є регулювання інтенсивності тепловідводу із зовнішньої поверхні її кокілю.

На підставі літературних та патентних даних і проведеного аналізу сучасного стану питання на підприємствах України сформульовано мету та завдання досліджень, які необхідно вирішити для її досягнення.

У другому розділі наведено відомості про матеріали, методи та методики, які використано в дослідженнях.

Лабораторні плавки проводили в індукційних електропечах ИТПЭ–0.03/0.05 ТМ 1 металоемністю 50 кг, ЛПЗ–67М металоемністю 5 кг та силітової печі. Промислові плавки проводили в індукційній електропечі мод. ІЧТ-6 в умовах АТ «ДЗПВ». Хімічний аналіз визначали спектральним методом спектрометром моделі «GDS–500A» фірми LECO. Термічний аналіз здійснювали з використанням потенціометрів КСП-4 та РегМик И8. Величину залишкових напружень у валках оцінювали з використанням магнітного структуроскопу SA51–Hc–001. Термічну обробку чавунних зразків здійснювали в муфельній печі. Металографічний аналіз проводили на оптичних металомікроскопах моделей МІМ–8М і «Neophot 21», кількість структурних складників визначали за програмою «Quick PHOTO Industrial 2.1» від приставки цифрової камери «Уеуе», мікротвердість структурних складників на приладі ПМТ-3. Механічні властивості чавунів: твердість, межу міцності при вигині, тимчасовий опір при розтягуванні визначали стандартними методами. Зносостійкість оцінювали за способом тертя-ковзання на машині СМЦ-2. Термостійкість визначали після 100 теплозмін $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C} \leftrightarrow 650 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$. Комп'ютерне моделювання процесу затвердіння та охолодження валків у комбінованій ливарній формі здійснювали за програмою LVMFlow v2.91. Обробку експериментальних даних проводили із застосуванням загальноприйнятих статистичних методик.

У третьому розділі наведено результати досліджень впливу модифікування та легування валкових чавунів на їх структуру, фізико-механічні та службові властивості. Встановлено, що модифікування чавуну РЗМ призводить до сфероїдизації евтектичного графіту та подальшого формування ледебуритної складової метастабільної системи фазових рівноваг.

Після переплаву зразків отримували половинчастий чавун, структура якого була представлена кулястими кристалами графіту, карбідною фазою пластинчастої морфології та ферито-перлітною складовою у ділянках вихідних аустенітних зерен. За результатами виконаних досліджень встановлено існування спадкового зв'язку між морфологією первинної структури і структурою переплавлених чавунів, що модифіковані РЗМ.

Для визначення фізико-механічних властивостей та встановлення областей утворення в мікроструктурі досліджуваних чавунів графітної складової вермикулярної форми модифікували валкові розплави лігатурами КМг9, СРЗМ30 і феротитаном ФТн70 при швидкостях охолодження, що мають місце у валковій формі. Встановлено, що раціональним залишковим вмістом РЗМ і Ті в досліджуваних чавунах є 0,082...0,085 і 0,40...0,41% відповідно. Властивості чавунів з раціональним залишковим вмістом РЗМ і Ті в порівнянні з вихідними

чавунами були вищі: $\sigma_B^{\text{виг}}$ на 15 і 38%, σ_B^p – на 35 і 29%, твердість – на 5 і 13%, відповідно при швидкостях охолодження 4,5 і 0,45 град/с. За результатами розрахунків величин залишкових напружень для дослідних чавунів встановлено, що вони цілком залежать від величин твердості, які, в свою чергу, визначаються кількістю фазових складових і величиною коефіцієнтів їх термічного лінійного розширення.

Результати досліджень впливу модифікування РЗМ та легування Ti і Hf валкових чавунів з застосуванням лігатур, що містять, мас. %: РЗМ – 35...45; С – 0,5...0,8; Si – 20...25; Ti – 20...25; Са – 0,5...2,0; Al – 0,5...2,0; Hf – 3...6 свідчать про те, що ця обробка розплавів білих чавунів позитивно впливає на їх зносостійкість, окрім того, між межею тимчасового опору при вигині і зносостійкістю робочого шару чавуну існує пропорційна залежність, що вказує на відсутність будь якого зв'язку між зносостійкістю і залишковими напруженнями в робочому шарі бочки валків.

Використання сумішей лігатури СРЗМ30 та оксиду гадолінію у співвідношенні 12:1 або лігатури СРЗМ30 та гадолінієвого концентрату у співвідношенні 10:1 при витраті суміші у кількості 0,54...0,77 мас. % при обробці розплавів дозволило зменшити залишкові напруження після відпалу валків при практичній незмінності їх первинної структури.

З метою застосування відходів різних спеціальних виробництв досліджено вплив суміші з компонентів, мас. %: шлак алюмотермічного виробництва лігатур на основі РЗМ – 73...77; відходи виробництва надпровідників – 10...20; карбід лантану – 7...13. При застосуванні запропонованої суміші для обробки валкових чавунів було досягнуто збільшення на 24...38% термостійкості чавуну при високому рівні міцності $\sigma_g^p=750...820$ МПа та практично незмінній величині залишкових фазових напружень.

В четвертому розділі досліджено вплив теплоізолювання (екранування) комбінованої ливарної форми в певний час на послідовності твердіння та охолодження елементів сортопрокатних чавунних валків.

Тобто, поставлену в роботі задачу вирішували за рахунок збільшення часу затвердіння чавуну у внутрішніх шарах бочки валка. Таке технологічне рішення призводить не тільки до зміни структури чавуну в бочці, зниження коефіцієнту його лінійної усадки, та, відповідно, зменшення величини залишкових напружень в робочому вибіленому шарі валка, але і покращення умов живлення розплавом нижньої шийки від надливу.

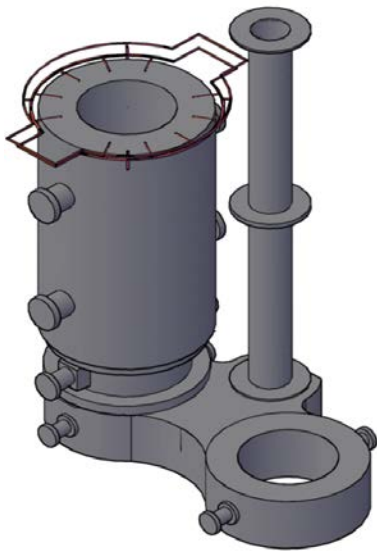
При вирішенні цієї задачі виходили з того, що робочий шар бочки валка утворюється за рахунок високій швидкості його охолодження і містить в мікроструктурі $\approx 30\%$ цементиту і ледебуриту. Передчасна теплоізоляція кокілю від навколишнього середовища після охолодження чавуну в інтервалі температур кристалізації може призвести до відпалу і розкладанню цементиту в його структурі.

Нижче температури евтектичного перетворення ≈ 1147 °С, відповідно до діаграми Fe-C, розчинність вуглецю в аустеніті зменшується з $\approx 2,06\%$ до $\approx 0,8\%$, відбувається виділення вторинного цементиту та його нашарування на

первинному і навколо зерен аустеніту у вигляді сітки, що забезпечує збільшення площі зносостійкої структурної складової в робочому шарі. При подальшому охолодженні бочки валка у кокілі робочий шар швидко охолоджується в інтервалі температур евтектоїдного перетворення, що зменшує можливість утворення у структурі фериту та підвищує твердість робочого шару валків. Нижче температури евтектоїдного перетворення на структурних складових робочого шару виділяється третинний цементит, що обумовлено зменшенням розчинності вуглецю починаючи з $\approx 0,02\%$. Тому частка третинного цементиту в формуванні зносостійкого робочого шару прокатного валка з початковим вмістом вуглецю 3,0 ... 3,8% незначна.

Таким чином в процесі затвердіння і охолодження валка зменшення теплопередачі в навколишнє середовище від кокілю необхідно здійснювати в момент закінчення евтектоїдного перетворення у чавуні робочого шару. Для цього в певний час (після завершення формування вибіленого шару на поверхні бочки валка) залиту комбіновану форму теплоізолювали ззовні і такою залишали до моменту вибивання валка з форми.

В якості теплоізолятора для екранування форми використовували двошарову термостійку тканину з алюмоборосілікатного скла марки «Т-13» (рис. 1).



а



б

Рисунок 1 – Схема розміщення сталевго каркасу на кокілі (а) та вид пристрою на ливарній формі, що розташована на двомісному піддоні (б)

Комп'ютерне моделювання процесу твердіння досліджуваних сортпрокатних валків проводили в програмі LVMFlow.

Адаптацію моделі та визначення часу початку теплоізолювання комбінованої ливарної форми проводили шляхом порівняння результатів термографічних досліджень затвердіння та охолодження валків, що наведено в роботах В.Є. Хричикова та даних, що отримані за результатами комп'ютерного моделювання.

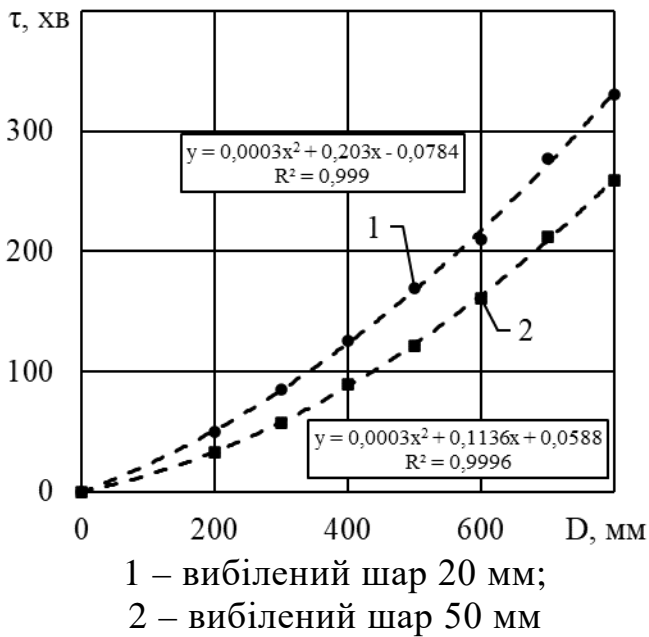


Рисунок 2 – Залежність часу початку теплоізолювання ливарної форми від діаметру бочки сортопрокатного валка

та теплоізолюваного валка діаметром 390 мм з чавуну СПХН-60 (див. рис. 3), які одночасно заповнювалися рідким чавуном на двомісному піддоні.

Після закінчення заливання дзеркало металу надливів обох валків утеплювали шаром екзотермічної суміші, а на 12-ій хвилині доливали розплавом з температурою 1410 °С.

Використання теплоізолювання ливарної форми за таким режимом дозволило знизити швидкість охолодження чавуну в бочці валків про що свідчать дані, представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Швидкість охолодження чавуну в бочці валка Ø390 мм від теплоізоляції ливарної форми за даними рис. 4

Температурний інтервал, °С	Швидкість охолодження валка (град/хв) на відстані від поверхні бочки			
	20 мм		60 мм	
	теплоізолюваний	серійний	теплоізолюваний	серійний
1390–700	4,79	4,93	5,52	5,75
700–400	0,66	0,86	0,65	0,86

Це дозволило знизити величину похибки комп'ютерного моделювання з 19,2 ... 30,4% до 1,8 ... 6,8%.

За результатами комп'ютерного моделювання по адаптованій моделі встановили залежність часу теплоізолювання ливарної форми від діаметру бочки (D, мм) сортопрокатного валка відповідно до температури фазового евтектоїдного перетворення у робочому шарі, що представлено на рис. 2.

З метою встановлення ефективності використання теплоізолювання (екранування) сортопрокатного валка були проведені термографічні дослідження процесу охолодження валка з використанням ХА-термопар, які встановлювали в бочку та нижню шийку контрольного



Рисунок 3 – Ливарна форма з термопарами

Величину коерцитивної сили (залишкові напруження) у вибіленому шарі бочок визначали на прокатних валках № 9097 (теплоізольована форма), № 8038 (серійна технологія), а також валка № 91412 поточного виробництва виконання СПХН-60, які були залиті в ідентичне кокільно-опочне оснащення. Результати вимірювань наведені в табл. 2 та представлені на рис. 4.

Таблиця 2 – Коерцитивна сила у вибіленому шарі бочок валків

Валок	Номер валка	Середнє арифметичне значення коерцитивної сили, А/см
Теплоізольований без термообробки	9097	6,36
Серійний без термообробки	8038	6,80
Серійний до термообробки	91412	6,76
Серійний після термообробки		6,10

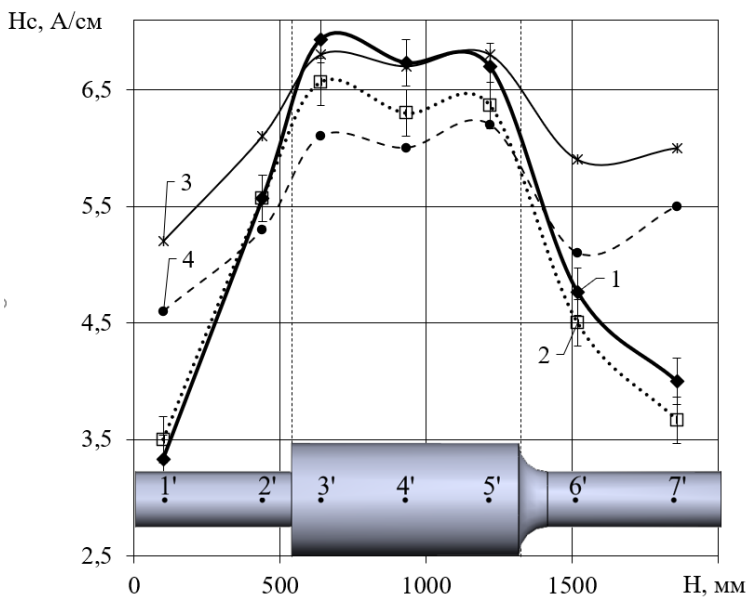


Рисунок 4 – Коерцитивна сила в шийках і бочках серійного (1) та теплоізольованого (2) валків, до термообробки (3) та після відпалу (4)

Наведені в табл. 2 дані та залежності на рис. 4 свідчать про те, що теплоізолювання ливарної форми сортопрокатних валків певною мірою сприяє зниженню величини коерцитивної сили у вибіленому шарі бочок, тобто знижує величину залишкових напружень. При цьому рівень такого зниження наближається до рівня зменшення залишкових напружень, що відбувається за рахунок проведення відпалу серійних валків. Тобто, валки, що виготовляють у теплоізолюваній ливарній формі можливо приймати у експлуатацію без термічної обробки.

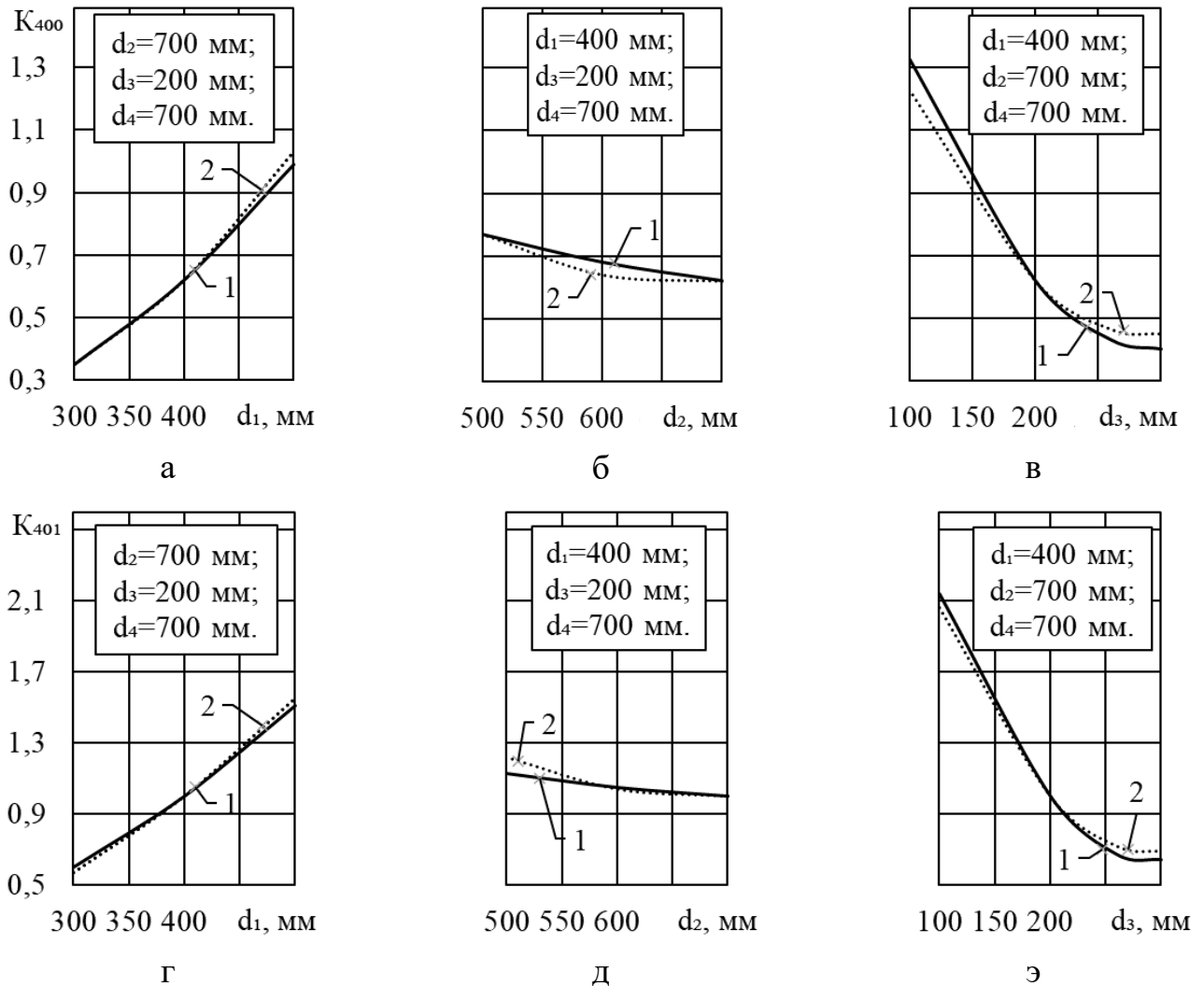
Умовою отримання валка без усадкової раковини в нижній шийці є співвідношення часу затвердіння чавуну в бочці та нижній шийки валка, яке повинне бути не меншим за одиницю. З урахуванням цього співвідношення під керівництвом д.т.н. Реп'яха С.І. розроблені параметричний критерій K_{400} для валків серійного виробництва та K_{401} для теплоізолюваних валків:

$$K_{400(401)} = f \cdot \left(\frac{b_2}{b_4}\right)^{0,2} \cdot \left(\frac{d_1}{d_3}\right)^{1,5} \cdot \frac{\left(\frac{b_4^2 \cdot d_4^2 \cdot d_3^2}{b_2^2}\right)^{0,2}}{\left(\frac{d_2^2}{d_1^2} - 0,75\right)^N}, \quad (1)$$

де f – коефіцієнт пропорційності, що враховує інтенсивність тепловіддачі із зовнішнього боку форми (для K_{400} $f=0,0038$, $N=0,2$, для K_{401} $f=0,0057$, $N=0,12$);

b_2 , b_4 – коефіцієнт теплоакумуючої здатності матеріалу кокілю і формувальної суміші для нижньої шийки валка при 400 °С відповідно; d_1 – внутрішній діаметр кокілю бочки валка; d_2 – зовнішній діаметр кокілю бочки валка; d_3 – внутрішній діаметр форми нижньої шийки валка; d_4 – зовнішній діаметр форми нижньої шийки валка.

Залежності величин K_{400} та K_{401} від зовнішнього діаметру кокілю (d_2), внутрішнього діаметру кокілю бочки валка (d_1) та внутрішнього діаметру форми нижньої шийки (d_3) при зовнішньому діаметрі форми нижньої шийки валка 700 мм (d_4) і використанні формувальної суміші на основі кварцового піску для форми нижньої шийки представлені на рис. 5.



1 – розрахунок за програмою LVMFlow; 2 – розрахунок по рівнянню (1)
Рисунок 5 – Залежність критерію K_{400} (а...в) та K_{401} (г...є) від розмірів форми валка при використанні формувальної суміші на основі кварцового піску для формування нижньої шийки

Аналіз отриманих залежностей (див. рис. 5, а...в) показав, що за серійною технологією виготовлення сортопрокатних валків неможливо досягти виконання умови послідовного затвердіння окремих елементів валка. При цьому, зміна

рівня теплофізичних властивостей формувальної суміші для нижньої шийки валка в межах використання відомих вогнетривких зернистих неметалевих матеріалів також не дозволить досягти виконання цієї умови, про що свідчить залежність на рис 6.

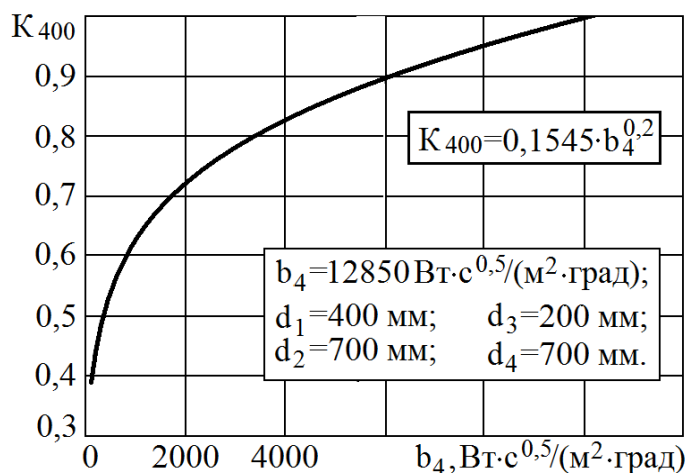


Рисунок 6 – Залежність критерію K_{400} від коефіцієнту теплоакумулюючої здатності формувальної суміші нижньої шийки валка

Таким чином, використання теплоізолювання (екранування) форми при охолодженні валка призводить до значного зниження ймовірності виникнення усадочних раковин в нижній шийці валка, що дозволяє після відповідних досліджень рекомендувати даний спосіб управління процесом затвердіння та структуроутворення і для інших типорозмірів сортопркатних валків.

У п'ятому розділі приведені результати дослідження структури за результатами візуального порівняння її відповідності щодо еталонних шкал

ГОСТ 3443 та величини залишкових напружень у вибіленому шарі сортопркатних валків, що виготовлені у серійних та теплоізолюваних ливарних формах.

Розподіл хімічних елементів та сірки (за методом Баумана) на перетинах бочки, верхньої і нижньої шийок валків, що відлиті у серійну та теплоізолювану ливарні форми, значимо не відрізняються. Про це свідчать результати металографічного аналізу чавуну в бочках серійного і теплоізолюваного валків виконання СПХН-60 які наведено в табл. 3 та на рис. 7, 8.

Таблиця 3 – Результати металографічного аналізу чавуну в бочках серійного і теплоізолюваного валків виконання СПХН-60

Валок (номери валків)	Відстань від поверхні бочки, мм	Кількість структурних складових, %			Дисперсність перліту	Характеристика включень пластинчастого графіту		
		Графіт	Цементит + ледебурит	Перліт		Форма	Довжина	Розподіл
Серійний (8038)	10	0,4	30,3	69,3	ПД1,0; ПД1,4	ПГ ф2	ПГд25	ПГр3
	60	4,5	28,6	66,9	ПД1,0; ПД 1,4	ПГ ф2	ПГд25	ПГр3
	110	7,3	25,4	67,3	ПД1,0; ПД1,4	ПГ ф2	ПГд45	ПГр3
	190	12,5	19,7	67,8	ПД1,0; ПД 1,4	ПГ ф2	ПГд90	ПГр3
Тепло- ізолювай (9097)	10	0,0	30,1	69,9	ПД1,0; ПД1,4	ПГ ф2	–	–
	60	5,7	26,7	67,6	ПД1,0; ПД1,4	ПГ ф2	ПГд45	ПГр3
	110	8,0	22,4	69,6	ПД 1,4; ПД1,6	ПГ ф2	ПГд90	ПГр3
	190	13,1	18,5	68,4	ПД 1,4; ПД1,6	ПГ ф2	ПГд180	ПГр3

Аналіз мікроструктур на рис. 7, де відстань від поверхні бочки, відповідно до номерів зображень: 1, 9, 5, 13 – 10 мм, 2, 10, 6, 14 – 35 мм, показує, що в робочому шарі серійного валка включення графіту мають пластинчасту форму, у поверхні – у вигляді невеликих розеток, що вглиб валка укрупнюються.

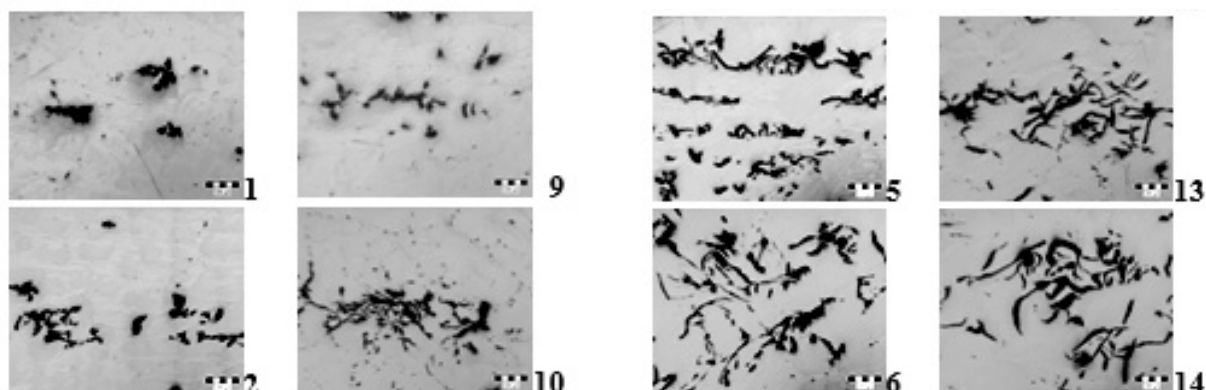


Рисунок 7 – Мікроструктура бочки серійного 1, 2, 5, 6 і теплоізолюваного 9, 10, 13, 14 валків ($\times 100$, не травлено)

Включення графіту на поверхні у вибіленому шарі теплоізолюваного валка практично були відсутні. Углиб від поверхні бочки валка кількість графітної складової збільшувалася від нуля на глибині 10 мм до 13,1% на відстані 190 мм, при цьому характеристика графіту складала ПГф2–ПГд180–ПГр3–ПГ12, що впливає з аналізу мікроструктур, представлених на рис. 8, де відстань від поверхні бочки, відповідно до номерів зображень: 1, 9, 17, 25 – 10 мм, 2, 10, 18, 26 – 35 мм.

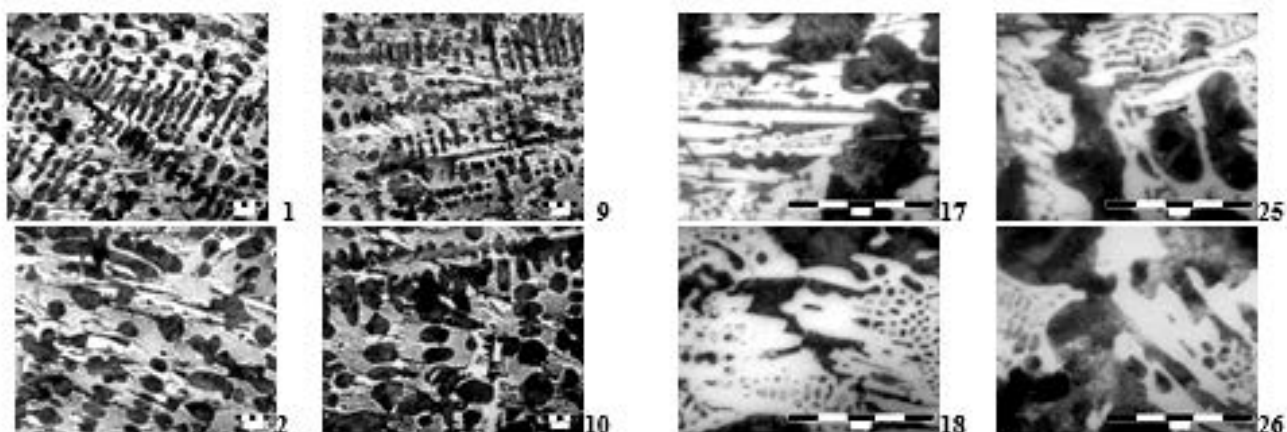


Рисунок 8 – Мікроструктура бочки серійного (1, 2 $\times 100$; 17, 18 $\times 400$) і теплоізолюваного (9, 10 $\times 100$; 25, 26 $\times 400$) валків, травлено ніталем

Кількість цементиту і ледебуриту в бочках серійного та теплоізолюваного валків наведено в табл. 4.

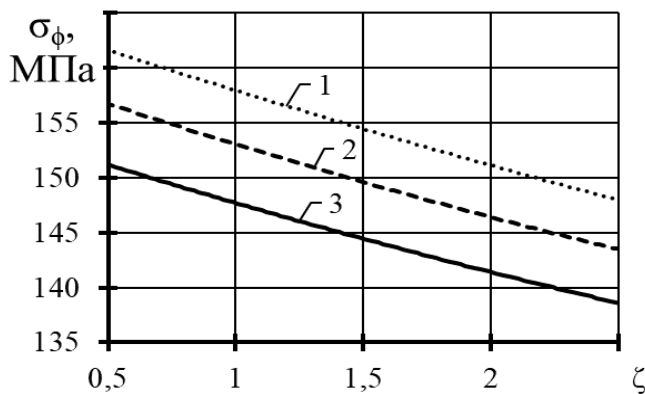
Таблиця 4 – Кількість цементиту та ледебуриту у чавуні бочок серійного та теплоізолюваного валків

Відстань від поверхні бочки, мм	Серійний валок, %		Теплоізолюваний валок, %	
	Цементит	Ледебурит	Цементит	Ледебурит
10	15,15	15,15	9,03	21,07
60	8,58	20,02	5,34	21,36
110	5,08	20,32	2,24	20,16
190	2,96	16,75	1,85	16,65

Встановлено, що у вибіленому шарі серійного валка зменшення кількості цементиту по глибині робочого є незначним, в порівнянні з теплоізолюваним валком. Це вказує на правильність обраного режиму теплоізоляції валка.

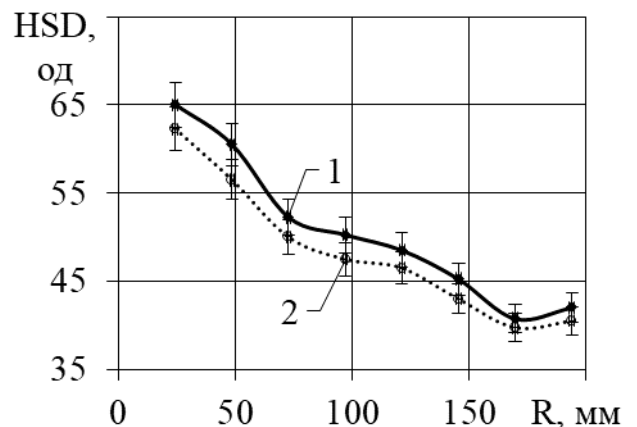
В осьовій зоні теплоізолюваного валка в порівнянні з серійним, кількість цементитної складової структури зменшилася на 9,4%, а кількість графітної – збільшилася на 8,3%, тому міцнісні властивості осьової зони теплоізолюваного валка мають бути вище в порівнянні з серійним валком за рахунок зменшення в структурі цементиту і збільшення графіту.

Залежність фазових напружень у вибіленому шарі сортопрокатного валка з чавуну СПХН-60 від об'ємного співвідношення ледебурит/цементит (ζ) представлена на рис. 9, а на рис. 10 представлена залежність твердості (HSD) у бочці валка від відстані від поверхні.



1 – перліт 67%; 2 – перліт 70%;
3 – перліт 73%

Рисунок 9 – Залежність фазових напружень в вибіленому шарі сортопрокатного валка від співвідношення вмісту ледебурита та цементиту (ζ) в структурі шару



1 – серійного;
2 – теплоізолюваного

Рисунок 10 – Твердість у бочці валка на відстані від поверхні (R)

З аналізу залежності на рис. 9 випливає, що зі збільшенням вмісту перліту і об'ємного співвідношення ледебурит/цементит в структурі вибіленого шару

величина фазових напружень зменшується. Відповідно до рис. 10 уповільнення інтенсивності теплообміну при охолодженні валків у формі з теплоізолюванням чинить вплив не лише на формування структури, але і на твердість.

Залишкові напруження у вибіленому шарі бочки валка розраховували за формулою:

$$P_Z = p_\phi + p_k, \quad (2)$$

де p_ϕ , p_k – фазові та усадкові напруження відповідно.

$$p_\phi = \phi_{\phi 1}^{1/3} \cdot (t_{\text{III1}} - t_{\text{НС}}) \cdot E_1 \cdot k_1 \cdot \left(1 - \frac{k_{\phi 1}}{k_1}\right) + \phi_{\phi 2}^{1/3} \cdot (t_{\text{III1}} - t_{\text{НС}}) \cdot E_1 \cdot k_1 \cdot \left(1 - \frac{k_{\phi 2}}{k_1}\right), \quad (3)$$

де $\phi_{\phi 1}$, $\phi_{\phi 2}$ – відносна об'ємна частка фаз $\phi 1$ та $\phi 2$ в структурі сплаву; t_{III1} – температури переходу сплаву з пластичного до пружного стану, °С; $t_{\text{НС}}$ – температура навколишнього середовища, °С; k_1 – середнє значення коефіцієнту термічного лінійного розширення (КТЛР) основи сплаву в інтервалі температур від $t_{\text{III1}} - t_{\text{НС}}$, град⁻¹; E_1 – середнє значення модуля пружності основи сплаву в інтервалі температур від t_{III1} до $t_{\text{НС}}$, МПа; $k_{\phi 1}$ и $k_{\phi 2}$ – коефіцієнти термічного лінійного розширення фази 1 і фази 2 в інтервалі температур від $t_{\text{III1}} - t_{\text{НС}}$ відповідно, град⁻¹.

$$p_k = \frac{\alpha_c - \alpha_\phi}{100 \cdot \left[\frac{1}{E_c} (1 - \mu_c) + \frac{1}{E_\phi} \left(\frac{b^2 + c^2}{b^2 - c^2} + \mu_\phi \right) \right]}. \quad (4)$$

Для проведення розрахунку набули наступних значень величин, що входять у формулу (2) при $b = 19,5$ см, $c = 14,5 \dots 17,5$ см:

– сірий чавун: $\alpha_c = 1,1\%$; $E_c = 110000$ МПа; $\mu_c = 0,25$;

– білий чавун: $\alpha_\phi = 1,37\%$; $E_\phi = 162000$ МПа; $\mu_\phi = 0,25$.

– величина вибіленого шару бочки $\Delta_{\phi\phi} = b - c$.

Результати розрахунків за формулою (4) представлені у вигляді залежностей $p_k = f(\Delta_{\phi\phi}, E_c, \alpha_c)$ на рис. 11.

Аналіз залежностей (див. рис. 11) показав, що величини контактних напружень (стискаючих) у бочці валка збільшуються з підвищенням товщини вибіленого шару і зменшенням коефіцієнту лінійної усадки сірого чавуну. В той же час величина контактних напружень у бочці валка практично не залежить від величини його модуля пружності при розтягуванні. Відповідно до залежності на рис. 11, г найбільш ефективним способом зміни напруженого стану робочого шару сортопрокатного валка є зміна співвідношення α_c/α_ϕ . При цьому, розтягуючі напруження в робочому шарі замінюються на стискаючі при $\alpha_c/\alpha_\phi < 1$.

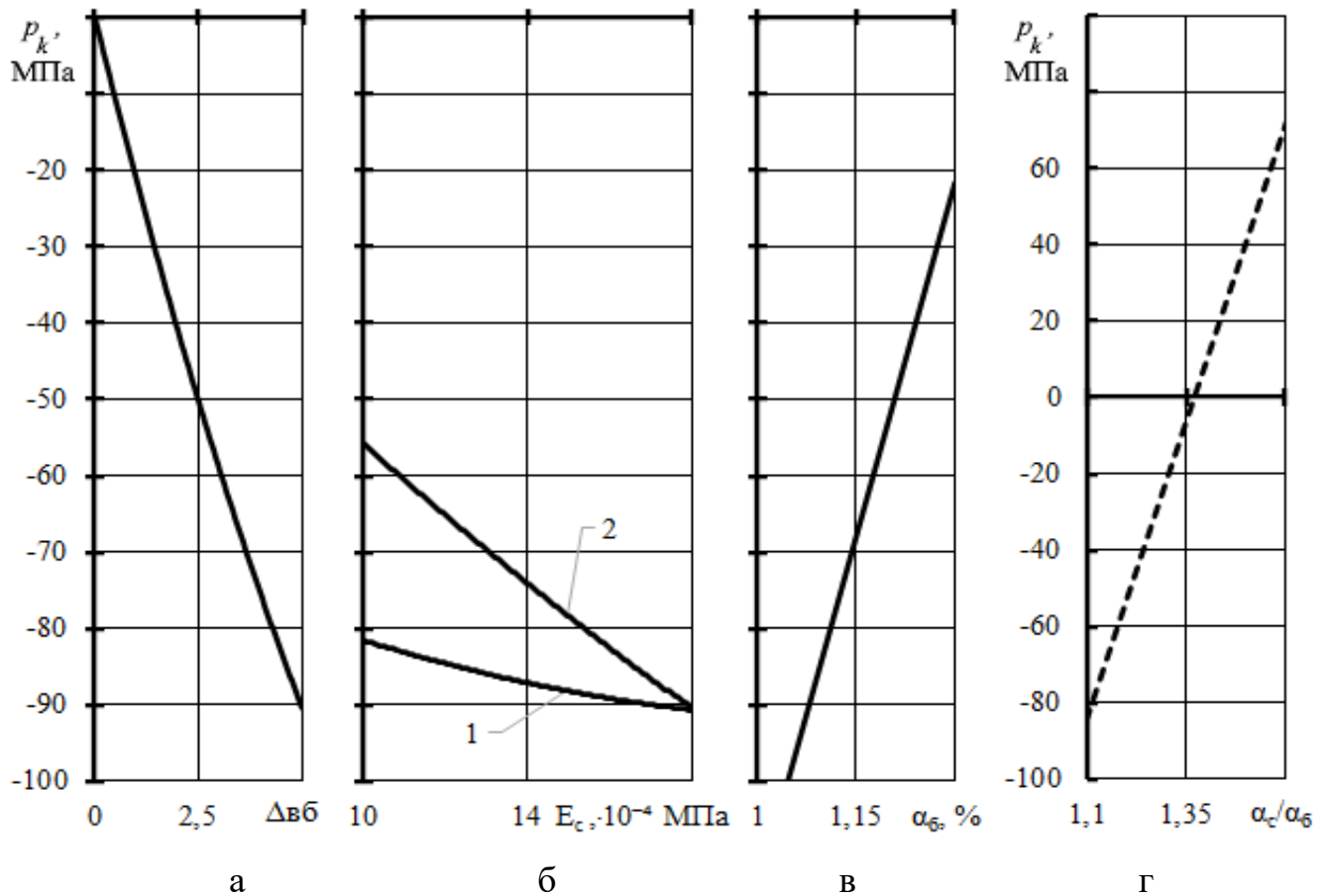


Рисунок 11 – Залежність величини контактеного напруження від товщини вибіленого шару $\Delta_{вб}$ (а) см, модуля пружності на розтягування сірого чавуну E_c (б) при $\Delta_{вб}=4,5$ см, коефіцієнту лінійної усадки сірого чавуну α_c (в) при $\Delta_{вб}=4,5$ см, співвідношення $\alpha_c/\alpha_б$ при $\alpha_б=1,37\%$ (г)

Значення змінних для розрахунку залишкових напружень серійних і теплоізолюваних валків наведено в табл. 5 і табл. 6, результати розрахунків - в табл. 7.

Таблиця 5 – Значення змінних для розрахунку за формулами

Валок	$\alpha_c, \%$	$\alpha_б, \%$	$E_б, \text{МПа}$	$E_c, \text{МПа}$	$\mu_б, \mu_c$
серійний	1,30	1,57	162000	110000	0,025
теплоізолюваний	1,20	1,50	160000	110000	0,025

Таблиця 6 – Кількість структурних складових в серійному і теплоізолюваному валках

Валок	Відстань від поверхні бочки, мм	Кількість структурних складових, %			
		Графіт	Ледебурит	Цементит	Перліт
серійний	10	0,4	15,15	15,15	69,3
теплоізолюваний	10	–	21,07	9,03	69,9

Таблиця 7 – Розрахункові значення коерцитивної сили і напруження у вибіленому шарі прокатних валків СПХН–60 з бочкою Ø390×785 мм

Рід напруження	Коерцитивна сила, А/см		Залишкові напруження, МПа	
	серійний	теплоізольований	серійний	теплоізольований
фазові	+4,05	+3,83	153	144
усадкові	-2,2	-2,41	-83	-91
сумарні	+1,85	+1,42	70	53

Отримані дані показали, що теплоізолювання ливарної форми при виробництві прокатних валків СПХН–60 з бочкою Ø390×785 мм, призводить до незначного збільшення фазових (розтягуючих) і істотного підвищення усадкових (стискаючих) напружень, що в сукупності за результатом взаємної компенсації забезпечує зниження розтягуючих залишкових напружень у вибіленому шарі чавуну на 17 МПа (24,5%).

Виходячи з того, що:

– за результатами оцінки якості теплоізолювані сортопрокатні валки відповідають вимогам до ТУ У 28.9–00187375–106:2018;

– величина залишкових напружень після термообробки у бочках валків серійного виробництва зменшується на 30...36%, а досягнута величина зменшення напружень у бочках теплоізолюваних валків складає 24,5%, що співмірно, теплоізолювані валки за розробленими рекомендаціями виготовлення можливо вводити в експлуатацію зі зменшеним за "об'ємом" термічної обробки або взагалі без неї.

ВИСНОВКИ

У дисертації наведені аналітичні та технологічні узагальнення у рамках рішення науково–технічної задачі зниження залишкових напружень та попередження виникнення усадкових раковин у прокатних валках з чавуну марки СПХН–60, які виготовляють в комбінованих ливарних формах, шляхом визначення закономірностей формування умов послідовного затвердіння розплаву між елементами прокатного валка, які сполучаються між собою, та залишкових напружень, що зумовлює підвищення якості, надійності, скорочення собівартості та циклу виготовлення прокатних валків.

У результаті теоретичних і експериментальних досліджень в області технології лиття в комбіновані ливарні форми були знайдені нові наукові рішення, отримані нові практичні результати і зроблені наступні висновки.

1. Аналіз сучасних технологій виробництва, якості сортопрокатних валків поточного виробництва на підприємстві АТ «ДЗПВ» (м. Дніпро), науково–технічної та патентної літератури свідчить, що робота, яка спрямована на вивчення та розробку наукових основ процесу лиття чавунних сортопрокатних валків з підвищеними механічними властивостями, термостійкістю, зносостійкістю та зменшеною величиною залишкових ливарних напружень при

відсутності усадкових дефектів, є актуальною, а розв'язувана в роботі задача має важливе наукове і прикладне значення.

2. Величина залишкових напружень як у робочому шарі, так і у серцевині бочки валків залежить від співвідношення коефіцієнтів лінійної усадки сірого та вибіленого чавунів (α_c/α_b). Чим більше це співвідношення тим вищі додаткові залишкові напруження в робочому шарі валка. Тобто, найбільш ефективним способом зміни напруженого стану робочого шару сортопрокатного валка є зміна величини співвідношення α_c/α_b . При цьому, розтягуючі напруження в робочому шарі замінюється на стискаючі при $\alpha_c/\alpha_b < 1$.

3. Зміна рівня теплофізичних властивостей формувальної суміші в межах значень відомих вогнетривких зернистих неметалевих матеріалів без теплоізолювання комбінованої ливарної форми не дозволяє попередити виникнення усадкової раковини в сполученні нижня шийка-бочка.

4. За інших рівних умов відповідно до розробленого способу час початку теплоізолювання (екранування) зовнішньої поверхні кокілю ливарної форми бочки валка діаметром у межах від 100 до 800 мм, залежить виключно від діаметру бочки валка.

5. Теплоізолювання (екранування) комбінованої ливарної форми сортопрокатного валка дозволяє: зменшити швидкість затвердіння та охолодження чавуну на 24,42% при температурі меншій за 700 °С у порівнянні з традиційною технологією; в осьовій зоні теплоізолюваного валка в порівнянні з серійним, зменшити кількість цементитної складової в структурі на 9,4% і збільшити кількість графітної складової на 8,3%, що призводить до підвищення пластичних властивостей чавуну в серцевині при зменшенні величини залишкових напружень; знизити рівень залишкових напружень у валках з чавуну СПХН-60 з діаметром бочки 390 мм на 24,5%, що сумірно зі зниженням залишкових напружень після термічної обробки валків, яке становить біля 30...36%; виключити з технології виробництва валків їх термічну обробку.

6. Розроблено параметричні критерії (K_{400} , K_{401}) використання яких дозволяє проводити прогнозування вірогідності виникнення усадкових дефектів у сортопрокатних валках з діаметром бочки від 300 до 500, нижньої шийки від 100 до 300 мм, що утворюються при використанні чавунного кокілю з зовнішнім діаметром від 500 до 700 мм. Встановлено, що збільшення внутрішнього діаметру кокілю бочки валка сприяє зменшенню усадкової раковини в нижній шийці валка, але не виключає вірогідності її виникнення. В той же час зміна товщини кокілю бочки валка в досліджених межах не робить істотного впливу на зміну величини усадкової раковини в нижній шийці валка.

7. Встановлено, що використання комплексного модифікатора на основі рідкісноземельних елементів та оксиду гадолінію у співвідношенні 12:1 яке проводили у розливному ковші при витраті суміші у кількості 0,54...0,76% від маси металу, а вторинне феросиліцієм, а також гадолінієвого концентрату у співвідношенні 10:1 у розливному ковші при витраті суміші у кількості 0,55...0,77 мас.%, не впливає на величину залишкових напружень у чавуні, але дозволяє зменшити залишкові напруження у ньому на 55,7...75,9% після проведення відпалу. Незалежно від способу модифікування і матеріалу

модифікатора та легуючих елементів, що були використані у роботі, литі чавунні сортопрокатні валки, що виготовляють за традиційною технологією, необхідно термічно обробляти з метою зменшення в них рівня залишкових напружень. Модифікування валкового чавуну РЗМ з гадолінієм і гафнієм не дозволяє використовувати прокатні валки без проведення термічної обробки.

8. Наукові та технологічні результати роботи впроваджені в навчальний процес Національної металургійної академії України і використовуються при виконанні випускних кваліфікаційних робіт бакалаврів та магістрів.

9. Результати промислового випробування розробленої технології теплоізолювання (екранування) ливарної форми і рекомендацій щодо її використання при виробництві валків з чавуну марки СПХН–60 свідчать про те, що мета, поставлена в даній роботі, є досягнутою.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ ВИКЛАДЕНО У ПУБЛІКАЦІЯХ:

Статті у виданнях, що включені до міжнародних науково–метричних баз:

1. Khrychikov V.E., **Belyu A.P.**, Ivanova L.Kh., Osypenko I.A., Menyailo E.V. Influence controlled cooling in the mould in the residual stresses in the cast iron rolling. *Системные технологии*. 2018. № 1 (114). С. 156–159. (Index Copernicus International)

Статті у наукових фахових виданнях:

2. Иванова Л.Х., Маймур Я.С., **Белый О.П.**, Муха Д.В. Исследование структуры модифицированных РЗМ чугунов при их повторном нагреве и охлаждении. *Теория и практика металлургии*. 2011. № 5–6(2) (82–83). С. 136–139.

3. Иванова Л.Х., Маймур Я.С., Осипенко И.А., **Белый А.П.**, Муха Д.В. Комплексномодифицированные валковые чугуны. *ВІСНИК Донбаської державної машинобудівної академії*. 2014. № 1 (32). С. 75–79.

4. Хрычиков В.Е., **Белый А.П.**, Иванова Л.Х., Осипенко И.А. Влияние регулируемого охлаждения на качество прокатного валка из отбеленного чугуна. *Металл и литьё Украины*. 2017. № 2–3 (285–286). С. 38–41.

5. Хрычиков В.Е., **Білий О.П.**, Иванова Л.Х., Осипенко І.О. Вплив теплоізолювання сортопрокатних валків з чавуну на величину залишкових ливарних напруг. *Теорія і практика металургії*. 2019. № 4. С. 16–20.

Статті у закордонних виданнях:

6. Хрычиков В.Е., **Белый А.П.**, Меняйло Е.В., Маркелова Д.В. Адаптация программы модели LVMFow к процессу затвердевания чугунного прокатного валка. *Литейное производство*. 2012. № 12. С. 16–18.

7. Ivanova L.Kh., **Bilyu A.P.**, Osipenko I.A. Cast rolling rolls with reduced residual stresses. *CZEŹSTOCHOWA*. 2018. № 78. С. 14–17.

Патенти України на винахід:

8. Суміш для модифікування та легування чавуну: пат. 111086 Україна. № 2014 02951; заявл. 24.03.2014; опубл. 25.03.2016, Бюл. № 6.

9. Спосіб лиття прокатних валків з чавуну з вермикулярним графітом: пат. 111919 Україна. № 2015 04434; заявл. 06.05.2015; опубл. 24.06.2016, Бюл. № 12.

10. Спосіб лиття прокатних валків: пат. 113331 Україна. № 2015 03784; заявл. 21.04.2015; опубл. 10.01.2017, Бюл. № 1.

11. Лігатура для білих чавунів: пат. 114364 Україна. № 2015 10422; заявл. 26.10.2015; опубл. 25.05.2017, Бюл. № 10.

12. Спосіб лиття прокатних валків з чавуну з вермикулярним графітом: пат. 113930 Україна. № 201601291; заявл. 15.02.2016; опубл. 27.03.2017, Бюл. № 6.

Матеріали наукових конференцій:

13. **Белый А.П.** Экспериментальное исследование процесса затвердевания прокатных валков с теплоизоляцией наружной поверхности бочки. *Неметалеві вкраплення і гази у ливарних сплавах* : збірник тез XIII Міжнародної науково-технічної конференції, Запоріжжя, 9–12 жовтня 2012 р. / відп. ред. В.В. Луньов. Запоріжжя : ЗНТУ, 2012. – С. 85.

14. **Bilyu A., Afonin S.** Analysis of simulation results of the solidification process of rolling rolls program LVMFlow. *MATERIALS AND METALLURGY : 11th INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF CROATIAN METALLURGICAL SOCIETY ŠIBENIK, JUNE 22 – 26. ŠIBENIK, 2014.* С. 52.

15. Іванова Л.Х., **Білий О.П.**, Алексєєнко А.С., Юрченко Ю.О. Модифікування та легування валкового чавуну. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні–2016* : матеріали VII Міжнарод. наук.–техн. конф., 30–31 трав. 2016 р. м. Київ / Загальна редакція Р.В. Лютий, І.М. Гурія. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. С. 61–62.

16. **Білий О.П.** Дослідження затвердіння прокатних валків *Перспективні технології, матеріали та обладнання у ливарному виробництві* : матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції, 25–28 вересня 2017 р. / за заг. ред. А.М. Фесенка, М. А. Турчаніна. Краматорськ : ДДМА, 2017. 20 с.

17. **Beliy A., Vitez I.** Analysis of simulation results of the solidification process of rolling rolls program LVMFlow. *MATERIALS AND METALLURGY : 13th INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF CROATIAN METALLURGICAL SOCIETY ŠIBENIK, JUNE 24 – 29. ŠIBENIK, 2018.* С. 214.

АНОТАЦІЯ

Білий Олександр Петрович. Технологічні основи використання керованого теплообміну екрануванням форми при виробництві чавунних прокатних валків. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.16.04 – Ливарне виробництво. Національна металургійна академія України, Міністерства освіти і науки України, м. Дніпро, 2020.

У роботі встановлено кількісний комплексний вплив фазового складу, товщини вибіленого шару чавуну та час теплоізолювання зовнішньої поверхні комбінованої форми сортопрокатних валків виконання СПХН-60 діаметром 380...400 мм на величину залишкових напружень в них. Це дозволяє оптимізувати технологію виготовлення сортопрокатних валків та знизити

величину залишкових напружень в бочці валків до рівня який не потребує їх термічної обробки.

Розроблено кількісні критерії за якими можливо проводити прогнозування вірогідності виникнення усадкової раковини в нижній шийки валків. За використанням розроблених критеріїв встановлено закономірності комплексного впливу зовнішнього теплоізолювання, радіальних розмірних параметрів кокілю форми і валків з діаметром бочки від 300 до 500 мм та величин коефіцієнтів теплоакумулюючої здатності матеріалів комбінованої ливарної форми на вірогідність виникнення усадкової раковини в нижній шийки валків.

Встановлено, що модифікування розплаву доєвтектичного чавуну у ківші механічною сумішшю з комплексного модифікатора на основі рідкісноземельних елементів та гадолінієвого концентрату у співвідношенні 10:1 при витраті суміші у кількості 0,54...0,77 мас.%, яке призводить до значного (на 70,4 ... 75,9%) збільшення здатності до зняття залишкових напружень при відпалу, але не дозволяє використовувати валки без їх термічної обробки.

Ключові слова: чавун, валок, комбінована форма, теплоізолювання, напруження, модифікатор, властивість, міцність, мікроструктура.

SUMMARY

Bilyi Oleksandr Petrovych. Technological bases of use of the controlled heat exchange by shielding of the mould at production of iron rolling rolls. - Qualification scientific work as a manuscript.

Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences (Ph.D.) in specialty 05.16.04 – Foundry. National Metallurgical Academy of Ukraine of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2020.

The dissertation is devoted to theoretical and technological generalizations within the solution of scientific and technical problem of reduction of residual stresses in a barrel of rolling mill rolls with a diameter of 300 ... 500 mm to a level which can be compared with size of residual stresses in heat-treated rolls, by establishing regularities of complex influence of structural, dimensional parameters of the combined mold used to make these rolls, the amount of residual stresses in their barrel.

As a result of theoretical and experimental research in the field of rolling mill casting technology, new scientific solutions have been found and new practical results have been obtained.

The quantitative complex influence of the phase composition and thickness of the bleached working layer of cast iron in the barrels of rolling rolls on the value of residual stresses due to the decrease in temperature difference between the center and the surface of the roll barrel, which is achieved by controlled external heat dissipation.

For cast iron rolling mills produced in combined and combined shielded molds, the patterns of influence of the diameter of the barrel in the range from 300 to 500 mm, the lower neck in the range from 100 to 300 mm and the diameter of the mold in the range from 500 to 700 mm, and the values of the coefficients of heat storage

capacity of their materials on the nature of the sequence of hardening of cast iron in the form.

Formalized ratios of the cooling duration of the elements of the cast iron roll with a barrel diameter in the range from 200 to 800 mm at a ratio of the wall thickness of the mold to the diameter of its barrel from 0.27 to 1.00 using external shielding of its combined form.

An increase in the ability to remove residual stresses during annealing when modifying the melt of pre-eutectic cast iron in a ladle with a mechanical mixture of a complex modifier based on rare earth elements and gadolinium concentrate in a ratio of 10: 1 at a flow rate of 0.54 ... 0.77 wt.

According to the results of research, the technology of shielding molds of cast iron rolls SPHN-60 was developed, which reduces the level of residual stresses in the cast roll to the level of heat-treated roll and prevents the formation of shrinkage shell in the lower neck of the roll and its barrel.

The developed parametric criteria allow at the stage of designing the mold for rolling rolls with a barrel diameter of 300 to 500 mm to predict the probability of shrinkage in the lower neck of the roll. The developed modifiers allow to increase mechanical properties of rolled pig-iron and to reduce the size of residual stresses in 1,56 ... 1,76 times in relation to size of reduction of residual stresses which is provided by thermal processing of rolls.

The theory of hardening of castings in the part of efficiency of management of hardening of pig-iron castings which are made in the combined foundry forms received the further development.

Keywords: cast iron, roll, combined form, shielding, residual stresses, heat treatment, modifier, property, strength, microstructure, adaptation.

ДЛЯ НОТАТОК

ДЛЯ НОТАТОК

Підписано до друку 03.08.2020. Формат 60x84 1/16. Папір офсетний
Умовн. друк. акр. 0,9. Обл.-вид. арк. 0,9. Зам. № 627
Наклад 100 прим.

Надруковано «Поліграфцентр» ФО-П Кочугурний Ю.М.,
свідоцтво про державну реєстрацію № 2 224 000 0000 073863,
м. Дніпро, вул. Воскресеньська, 11, 49000

