

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БІЛИЙ ОЛЕКСАНДР ПЕТРОВИЧ

УДК 621.742.4

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

Спеціальність 05.16.04 – Ливарне виробництво

Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

—  О.П. Білий

Науковий керівник – ХРИЧИКОВ В.Є., д-р техн. наук, професор

Дніпро – 2020

АНОТАЦІЯ

Білий О.П. 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.

Дисертаційна робота присвячена теоретичним та технологічним узагальненням в рамках рішення науково–технічної задачі зниження залишкових напружень в бочках сортопрокатних валків діаметром 300...500 мм до рівня, який можна порівняти з величиною залишкових напружень в термооброблених валках, шляхом встановлення закономірностей комплексного впливу структурних, теплофізичних і розмірних параметрів комбінованої ливарної форми, використовуваної для виготовлення таких валків, на величину залишкових напружень в їх бочках.

В результаті теоретичних і експериментальних досліджень в області технології лиття прокатних валків були знайдені нові наукові рішення та отримані нові практичні результати.

Встановлений 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 осьовою зоною та поверхнею бочки валка, який досягають за рахунок керованого зовнішнього тепловідведення від бочки валка.

Для чавунних сортопрокатних валків, що виготовляють в комбінованій та комбінованій екранованій ливарній формі, встановлено закономірності впливу діаметра бочки в межах від 300 до 500 мм, нижньої шийки в межах від 100 до 300 мм і діаметра кокілю в межах від 500 до 700 мм, а також

величин коефіцієнтів теплоакumuлюючої здатності їх матеріалів на характер послідовності затвердіння чавуну у формі.

Формалізовані співвідношення тривалості охолодження елементів чавунних валків з діаметрами бочок в межах від 200 до 800 мм при співвідношенні товщини стінки кокілю до діаметра його бочки від 0,27 до 1,00 при використанні зовнішнього екранування його комбінованої форми.

Встановлено збільшення здатності до зняття залишкових напружень за відпалу при модифікуванні розплаву доевтектичного чавуну у ковші 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. %.

За результатами виконання досліджень розроблена технологія екранування ливарних форм чавунних сортопрокатних валків виконання СПХН-60, що дозволяє зменшити рівень залишкових напружень у валку в литому валку до рівня термічно обробленого і запобігає утворенню усадкової раковини в сполученні нижньої шийки валка і його бочки.

Розроблені параметричні критерії дозволяють на стадії проектування ливарної форми для сортопрокатних валків з діаметром бочки від 300 до 500 мм здійснювати прогноз ймовірності виникнення усадкових раковин у нижній шийці валка. Розроблені модифікатори дозволяють підвищити механічні властивості валкового чавуну і зменшити величину залишкових напружень в 1,56...1,76 разів по відношенню до величини зниження залишкових напружень, яку забезпечує термічне оброблення валків.

Подальший розвиток отримала теорія затвердіння виливків в частині ефективності керування затвердінням чавунних виливків, які виготовляють в комбінованих ливарних формах.

Ключові слова: чавун, валок, комбінована форма, екранування, залишкові напруження, термічне оброблення, модифікатор, властивість, міцність, мікроструктура, адаптація

ABSTRACT

Bilyi O. Technological bases of use of the controlled heat exchange by shielding of the mould at production of iron rolling rolls. – Qualification scientific work as the 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

Список публікацій здобувача

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

1. Khrychikov V.E., **Belyy 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. Хричиков В.Є., **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., **Bilyy 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 вкращення 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. **Bilyy 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. C. 214.*

ЗМІСТ

стор.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	13
ВСТУП	14
РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ. МЕТА І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	22
1.1 Вимоги до якості сортопрокатних валків	22
1.2 Залишкові напруження в сортопрокатних валках	23
1.2.1 Класифікація залишкових напружень та способів їх зниження.....	23
1.2.2 Розрахунки залишкових ливарних напружень.....	29
1.3 Усадкові раковини і пухкість в сортопрокатних валках.....	31
1.3.1 Способи попередження виникнення усадкових раковин і пухкості у валках, які виготовляють на підприємствах України.....	31
1.3.2 Причини утворення усадкових раковин і пухкості у валках.....	33
1.4 Мета і завдання дослідження	40
1.5 Висновки	41
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	42
2.1 Матеріали	42
2.2. Плавка і розливання чавунів	43
2.3. Термічний аналіз	45
2.4 Визначення величини залишкових напружень у валках.....	46
2.5 Термічне оброблення	46
2.6 Визначення схильності чавуну до зняття залишкових напружень термічним обробленням	47
2.7 Підготовка зразків для проведення досліджень.....	48
2.8 Зняття сірчаних відбитків з дисків чавунного прокатного валка	48
2.9 Хімічний аналіз	51
2.10 Металографічний аналіз.....	51
2.11 Визначення твердості, міцності і зносостійкості чавуну.....	52

2.12 Випробування термостійкості.....	54
2.13 Комп'ютерне моделювання процесу затвердіння та охолодження валків у комбінованій ливарній формі.....	55
2.14 Статистична обробка експериментальних даних	55
2.15 Висновки	56
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МОДИФІКУВАННЯ ТА ЛЕГУВАННЯ ВАЛКОВОГО ЧАВУНУ НА ЙОГО ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ТА СЛУЖБОВІ ВЛАСТИВОСТІ.....	58
3.1 Вибілені модифіковані рідкісноземельними металами валкові чавуни	58
3.2 Комплексно модифіковані валкові чавуни.....	60
3.3 Вплив суміші для модифікування та легування валкових чавунів на їх міцність та термостійкість.....	67
3.4 Вплив комплексного модифікатора, що містить РЗМ, титан і гафній, на міцність та зносостійкість валкових чавунів.....	70
3.5 Вплив структурних складових на залишкові фазові напруження в досліджуваних чавунах.....	72
3.6 Вплив сумішей з комплексного модифікатора та компонентів, що містять гадоліній, на величину залишкових фазових напружень у чавуні після відпалювання	76
3.7 Висновки	78
РОЗДІЛ 4 ТЕРМОЧАСОВІ РЕЖИМИ РЕГУЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ТВЕРДІННЯ ТА ОХОЛОДЖЕННЯ ЧАВУННИХ ПРОКАТНИХ ВАЛКІВ ЗІ ЗМЕНШЕНИМ РІВНЕМ ЗАЛИШКОВИХ ЛИВАРНИХ НАПРУЖЕНЬ	79
4.1 Обґрунтування часу реалізації процесу гарячого посаду	79
4.2 Дослідження впливу теплової ізоляції кокілью від зовнішнього середовища на затвердіння і охолодження чавунного прокатного валка ...	81
4.2.1 Вихідні передумови реалізації технології екранування ливарної форми.....	81

4.2.2 Обґрунтування температурних режимів роботи матеріалу теплоізоляції і розробка конструкції пристрою для виконання гарячого посаду	82
4.2.3 Технологічні особливості проведення дослідження впливу теплоізоляції ливарної форми на температуру твердіння та охолодження теплоізольованого та серійного валків	84
4.2.4 Адаптація моделі LVMFlow до процесу затвердіння чавунного прокатного валка в комбінованій кокільно-піщаній ливарній формі.....	86
4.2.5 Визначення часу початку теплоізоляції ливарної форми чавунного прокатного валка від навколишнього середовища	92
4.3 Термографічне дослідження твердіння та охолодження бочки теплоізольованого і серійного валків.....	95
4.4 Порівняння залишкових ливарних напружень в теплоізольованому і серійних валках	97
4.5 Дослідження умов утворення усадкової раковини в нижній шийці валків	100
4.6 Висновки	113
РОЗДІЛ 5 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ПРОКАТНИХ ВАЛКІВ ЗІ ЗМЕНШЕНИМ РІВНЕМ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ.....	117
5.1 Розподіл хімічних елементів по перерізах частин прокатного валка..	117
5.2 Вплив регульованого охолодження на мікроструктуру прокатного валка з вибіленого чавуну	117
5.2.1 Мікроструктура матеріалу бочок серійного та теплоізольованого валків	122
5.2.2 Мікроструктура матеріалу нижніх шийок серійного і теплоізольованого валків.....	126
5.2.3 Мікроструктура матеріалу верхніх шийок серійного і теплоізольованого валків.....	130

5.3 Вплив регульованого охолодження на твердість досліджуваних прокатних валків	135
5.4 Розрахунок напружень у вибіленому шарі серійного і теплоізовованого валків.....	138
5.5 Висновки	144
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	146
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	149
Додаток А СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.....	161
Додаток Б АКТ ДОСЛІДНО-ПРОМИСЛОВОЇ ПЕРЕВІРКИ	164
Додаток В АКТ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ В НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЦЕС.....	166

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

НМетАУ – Національна металургійна академія України;

АТ «ДЗПВ» – АТ «Дніпропетровський завод прокатних валків»;

РЗМ – рідкісноземельний метал;

СРЗМ30 – комплексний кременистий феросплав с РЗМ;

V – швидкість зміни температури;

$\sigma_B^{\text{виг}}$ – тимчасовий опір при вигині ГОСТ 27208-87, МПа;

σ_B^p – тимчасовий опір при розтягу ГОСТ 27208-87, МПа.

σ_ϕ – залишкові фазові напруження, МПа;

НВ – твердість металу за Брінеллем;

НSD – твердість металу за Шором;

Нс – коерцитивна сила, А/см;

ОБ – відстань від поверхні бочки валка, мм;

ОВШ – відстань від поверхні верхньої шийки валка, мм;

ОНШ – відстань від поверхні нижньої шийки валка, мм;

ЧКГ – чавун з кулястим графітом;

ЧВГ – чавун з вермикулярним графітом.

ВСТУП

Актуальність теми. Виробництво металопрокату в Україні досягло 18 млн. т [1], причому 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 чавунів (>90%) і заєвтектоїдної сталі, частка ж кованих валків складає ~5%.

Згідно діючим технічним умовам (ТУ У 28.9-001877375-106:2018 Валки чавунні і сталеві для гарячого прокатування металів. Технічні умови) 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 відпалювання або довготривалого природнього старіння. Виходячи з умов короткостроковості поставок чавунних валків на підприємства-споживачі на сьогодні зниження напружень за рахунок термообробленняки 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 термічного оброблення. Питаннями модифікування і легування, теплофізичної дії на метали, що твердіють у формі, і сплавами 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 застосування для валкових чавунів модифікаторів, що містять рідкісноземельні метали (РЗМ) та комплексної дії на структуру чавунів модифікування РЗМ і легування, відсутні дані про результати і можливості теплофізичного впливу на структуру і якість чавунних валків тощо, 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 додаткового термічного оброблення - відпалювання.

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 Г522Г10003 «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 термічного оброблення або

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 напружень в бочці валків, але і на 35...45% знизити собівартість їх виробництва за рахунок введення валків в експлуатацію без їх термічного оброблення.

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 напружень 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, застосування яких дозволяє зменшити рівень залишкових напружень в литому валку до рівня термічно обробленого валка. Розробка пройшла дослідно-промисловою перевіркою 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 відпалюванні 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 p.); 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 p.); VI Міжнародної науково–технічної конференції «Перспективні технології, матеріали та обладнання у ливарному виробництві» (Краматорськ, 2017 p.); 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 закордонних виданнях, 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.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ. МЕТА І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Вимоги до якості сортопрокатних валків

У числі поширених причин виведення валків з експлуатації є, як правило, тріщини, що виникають у бочках в процесі експлуатації валків, руйнування валка в області бочки і шийки, а також сколи сорту [2]. Однією з причин руйнування валків в області з'єднання бочки є залишкові напруження. З метою зниження залишкових напружень валки, найчастіше, перед експлуатацією піддають природному старінню у споживача:

- для валків з твердістю до 50 HSD - не менше 3 місяців;
- для валків з твердістю 50 HSD і вище - не менше 6 місяців.

На вимогу замовника сортопрокатні валки замість природного старіння можуть бути термічно оброблені по режиму, вказаному в додатку АТ «ДЗПВ» від 01.04.2004 р. до ТУ У 28.9-00187375-106:2018 та приведену в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Режим термічної обробки сортопрокатних валків для зниження залишкових напружень

№	Найменування операції	Температура, °C	V, °C/годину	Тривалість, годин
1	Валок завантажується в піч з температурою не більше 100 °C. Нагрівання до температури печі (при садінні в піч з температурою більше 30°C)	Нагрівання до 100		5
2	Нагрівання 1	50-300	25	10
3	Нагрівання 2	300-600	30	10
4	Ізотермічна витримка	600	—	8
5	Охолодження з піччю	600-100	15-25	20

Примітки. V – швидкість зміни температури; загальна тривалість термічної обробки 48 годин.

При цьому в числі основних здавальних показників сортопрокатних валків відповідно до ТУ У 28.9-00187375-106:2018 є: діаметр і довжина бочки, діаметри і довжина шийок, маса валка, твердість робочого шару на контрольній глибині, глибина робочого шару, масова частка хімічних елементів в робочому шарі, у шийках і привідних частинах валків карбідна сітка не допускається, на робочій поверхні бочок і шийок валків чистових клітей не припустимі раковини, тріщини, шлакові і земляні включення.

Термічне оброблення сортопрокатних валків виконують з метою зниження залишкових напружень. Виконання такої термічної обробки складає 30...40% собівартості валка та дозволяє знизити величину залишкових напружень у робочому шарі на 28...32 МПа за даними вітчизняних підприємств, що виготовляють сортопрокатні валки.

1.2 Залишкові напруження в сортопрокатних валках

1.2.1 Класифікація залишкових напружень та способів їх зниження

Залишкові напруження [3-15] розподіляють на фазові та усадкові [16]. Способи зниження залишкових напружень можливо розділити на ті, що знижують напруження під час формування виливка, та на ті, що знижують в охолодженню виливку.

Класифікація способів зниження залишкових напружень до закінчення твердіння розплаву у формі приведена на рис. 1.1.

З приведеної на рис. 1.1 класифікації способів зниження залишкових напружень до закінчення твердіння розплаву у формі витікає, що вони залежать як від властивостей металу та форми, так і від зовнішньої дії при охолодженні виливка.

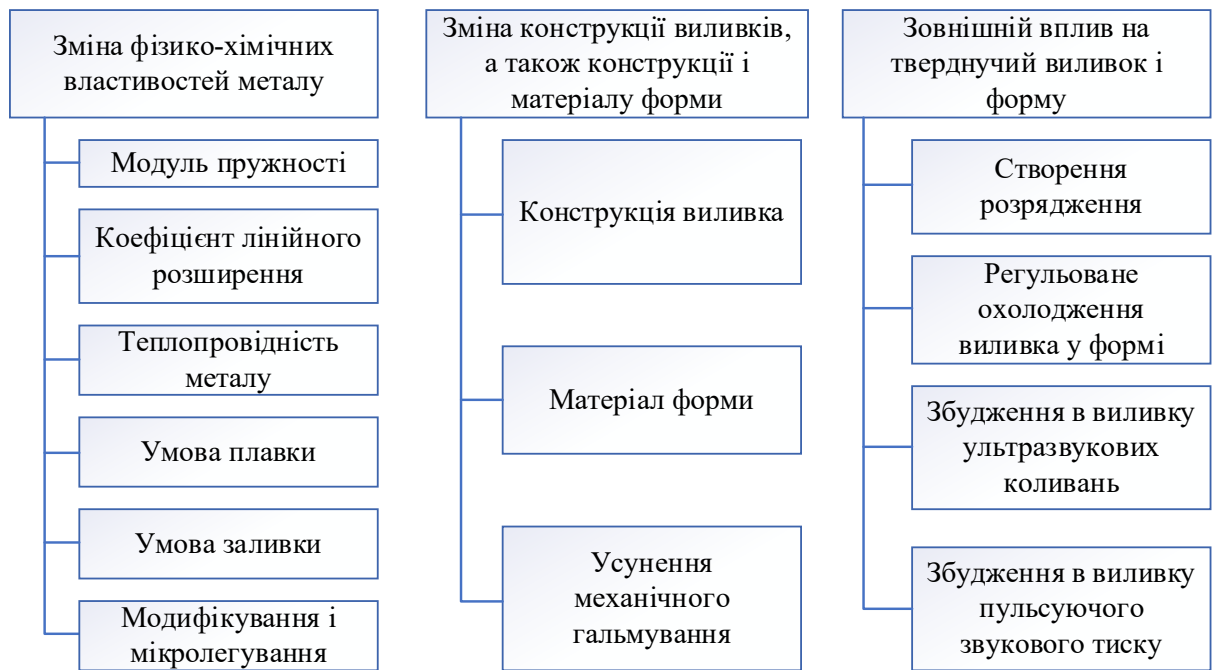


Рисунок 1.1 – Класифікація способів зниження залишкових напружень до закінчення твердіння розплаву у формі

Зміна фізико-хімічних властивостей металу [16]:

- модуль пружності – збільшення модуля пружності прямо пропорційно підвищує залишкову ливарну напругу;
- коефіцієнт лінійного розширення – з його збільшенням збільшуються і залишкові напруження [16];
- теплопровідність металу – зі збільшенням теплопровідності металу залишкові напруження зменшуються [16]
- умови плавки – для кожного виду сплаву існує гранично припустима температура перегрівання і тривалість ізотермічної витримки за цієї температури, а також матеріал футерування, міра розкислювання, режим десульфурації, що призводить до зміни макро– і мікроструктури металу у виливку і, відповідно, його напруженого стану;
- умови заливки – зниження температури випуску металу з печі, збільшення часу заливки і розосереджене підведення металу у форму сприяє зниженню залишкових напружень у виливку;

– модифікування і мікролегування – змінюючи структуру металу дані способи можуть призводити як до зменшення, так і до збільшення залишкових напружень.

Зміна конструкції виливка, а також конструкції і матеріалу форми:

– конструкція виливка – зниженню рівня напружень у виливку сприяє рівномірна товщина стінок виливка, використання тимчасових елементів гальмування лінійної усадки виливка, що охолоджується;

– зміна матеріалу форми – використання формувальних матеріалів з низькою величиною теплоакumuлюючої здатності уповільнює швидкість твердіння, що сприяє зниженню залишкових напружень у виливку;

– усунення механічного гальмування – використання формувальних сумішей з високою податливістю попереджає розвиток у виливку значних залишкових напружень;

– регульоване охолодження виливка у формі – зменшення інтенсивності тепловідводу в ливарній формі, що охолоджується, сприяє зменшенню величини залишкових напружень, яке реалізують, наприклад: шляхом створення розрідження в проміжку між виливком і формою при її певних температурах [17, 18]; обігрівом форми індуктором [19], охолодженням виливка в газоподібному або рідкому середовищі [20], розміщенням у стінки форми вогнетривких блоків [21] і іншими способами [22-24], зміною умов тепловіддачі від бочки валка, яка твердіє [25].

– збудження у виливку ультразвукових коливань – використання ультразвукових коливань для зняття залишкових напружень [26, 27].

– збудження у виливку пульсуючого звукового тиску - пульсуючий дозвуковий повітряний потік [28-30], загартування в пульсуючому повітряному потоці [31].

Класифікація способів зниження залишкових напружень в затверділому виливку представлена на рис. 1.2.

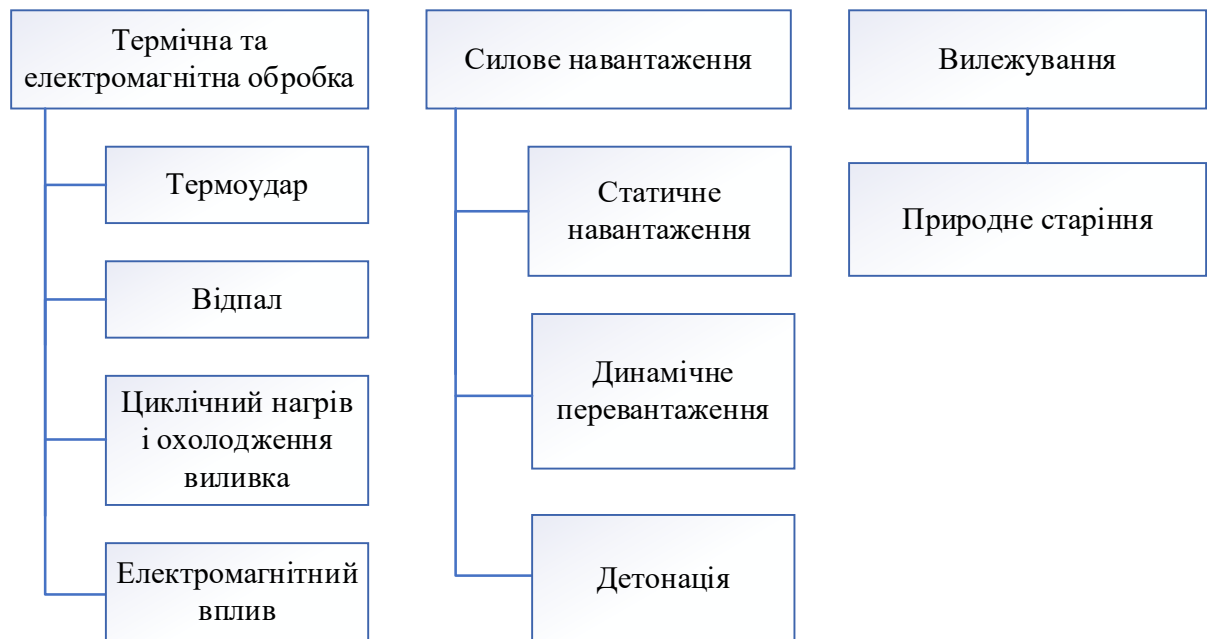


Рисунок 1.2 – Класифікація способів зниження залишкових напружень в затверділому виливку

З приведеної на рис. 1.2 класифікації способів зниження залишкових напружень в затверділому виливку витікає, що їх рівень в литих виробках можливо знизити шляхом теплофізичних дій на виливок.

Термічна і електромагнітна обробка:

- термоудар – завантаження виливків з температурою довкілля в заздалегідь нагріту до певної температури піч з наступною ізотермічною витримкою [32];
- відпал – термообробка прокатних валків, в цілях зняття залишкових напружень [33-35];
- циклічний нагрів і охолодження виливка – багатократний нагрів і охолодження [36];
- електромагнітна дія – обробка виробів в електромагнітному полі [37, 38], імпульсному магнітному полі [39, 40], вібрацією у електромагнітному полі [41], імпульсом енергії інфрачервоного випромінювання [42], поодиноким імпульсом електричного струму [43].

Силове навантаження у вигляді:

- статичного навантаження [44];
- динамічного перевантаження шляхом вібрації [45], віброобробкой на резонансних частотах [46-48];
- детонацією – вибухом в результаті детонації [49].

Вилежування. Цей спосіб припускає природне старіння виливка і реалізують його шляхом тривалого (1...12 місяців) вилежування виливків на відкритому повітрі.

Управління охолодженням виливка у формі, на сьогодні, є найбільш перспективним напрямом в рішенні задачі зниження залишкових напружень у виливках. Це обумовлено тим, що цей спосіб не приводить до збільшення циклу виробництва великотоннажних виливків та придатний для виливків простої геометричної форми, зокрема, прокатних валків. Проте, особливості структуроутворення чавунних валків, вимоги до їх якості, форма, розміри і маса, мабуть, при реалізації цих способів вимагають певної конкретизації і визначення меж і умов застосовності цього способу. Зокрема за рахунок:

- зміни фізико-хімічних властивостей металу, спрямованої на зменшення залишкових напружень шляхом зміни величини модуля пружності, коефіцієнту термічного лінійного розширення, теплопровідності чавуну, а також коригування умов плавки і заливки, використання модифікування і мікролегування пов'язано зі зміною експлуатаційних властивостей сортопрокатного валка, що не може бути розглянуто як придатний спосіб зниження залишкових напружень без використання термічної обробки;

- зміни конструкції виливка, а також конструкції і матеріалу форми, усунення механічного гальмування, створення розрядки, збудження у виливку ультразвукових коливань, збудження у виливку пульсуючого звукового тиску. Ці заходи важкоздійснювані і малоефективні при виготовленні великотоннажних виливків з сірого чавуну;

– термічна або електромагнітна обробка виливків (термоудар, відпал, циклічний нагрів і охолодження виливка, електромагнітна дія), силове навантаження (статичне навантаження, динамічне перевантаження, детонація) або вилежування подовжують цикл виготовлення литва і збільшують його собівартість.

З числа розглянутих способів для сортопрокатних валків найбільш прийнятним є регулювання охолодження виливка у формі.

Одним з таких способів управління залишковими напруженнями у виливках є регулювання теплообміну при литті валків в комбінованих формах наприклад [25], шляхом в області бочки валка умов інтенсивного охолодження при кристалізації робочого шару валка і повільного – після його твердіння. З цією метою проміжок між кокілем і бочкою валка заповнюють рідким алюмінієм, а в певний момент (по закінченню формування вибіленого шару) алюміній з проміжку видаляють. Газовий проміжок, що утворюється при цьому між бочкою і кокілем, різко зменшує інтенсивність тепловіддачі від виливка до кокілю, що призводить до формування сірого чавуну у внутрішній частині бочки. Як результат уповільнення охолодження, за даними [25] призводить до зниження рівня залишкових напружень у валках, що пояснюється попередженням їх виникнення пластичною деформацією затверділого чавуну.

Істотним недоліком цього способу є складність його технічної реалізації, що обумовлено конструкцією валкової форми і умовами формування в ній виливка.

Одним із способів зміни швидкості твердіння є використання екранів між випромінюючою поверхнею і довкіллям. Для реалізації цього процесу з метою виконання вимог технічних умов до структури сортопрокатних валків, екранування форми повинно здійснюватися в певний момент часу з урахуванням діаметра бочки валка, товщини стінки кокілю та їх теплофізичних властивостей.

Проте, такі дані на сьогодні відсутні, як і відсутній будь-який параметричний критерій первинної оцінки міри послідовності твердіння розплаву в напрямку від нижньої шийки до бочки валка, далі верхньої шийки і надливу на ній. Відсутність знань таких закономірностей може привести або до невідповідності вимогам по структурі вироблюваних валків і високій внутрішній напрузі в них, або до виникнення неприпустимо великої усадкової раковини в області сполучення бочки і нижньої шийки. В зв'язку з цим комплексне завдання по зниженню напруженого стану валків і запобіганню виникнення в них неприпустимих усадкових дефектів на сьогодні є актуальним.

1.2.2 Розрахунки залишкових ливарних напружень

Залишкові напруження у чавунних валках з вибіленим робочим шаром складаються з фазових та усадкових напружень .

Величину залишкових фазових напружень у сплаві, охолодженому до температури навколишнього середовища (t_{HC}), у першому наближенні автор С.І. Реп'ях [50] пропонує розраховувати зі спрощеною формулою, МПа:

$$p_{\phi} = \phi^{1/3} \cdot (t_{III1} - t_{HC}) \cdot E_1 \cdot k_1 \cdot \left(1 - \frac{k_{\phi}}{k_1} \right), \quad (1.1)$$

де ϕ – відносна об'ємна частка другої фази (фаз) у структурі сплаву;

t_{III1} – температура переходу сплаву з пластичного до пружного стану, °С;

k_1, k_{ϕ} – середні значення КТЛР основи сплаву та другої фази в інтервалі температур від $t_{III1} - t_{HC}$, град⁻¹;

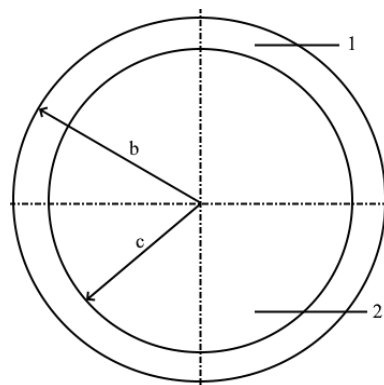
E_1 – середнє значення модуля пружності основи сплаву в інтервалі температур від $t_{\text{ПП1}}$ до $t_{\text{НС}}$, МПа.

Для розрахунку фазових напружень чавунів, що мають три фази, формулу (1.1), виходячи з припущення про адитивний вплив кожної фази на напруження основної фази в чавуні, можливо представити у вигляді:

$$p_{\phi} = \phi^{1/3} \cdot (t_{\text{ПП1}} - t_{\text{НС}}) \cdot E_1 \cdot k_1 \cdot \left(1 - \frac{k_{\phi 1}}{k_1}\right) + \phi^{1/3} \cdot (t_{\text{ПП1}} - t_{\text{НС}}) \cdot E_1 \cdot k_1 \cdot \left(1 - \frac{k_{\phi 2}}{k_1}\right), \quad (1.2)$$

де $k_{\phi 1}$ и $k_{\phi 2}$ – коефіцієнти термічного лінійного розширення фази 1 і фази 2, відповідно, град⁻¹.

Величину усадкових напружень для двошарових сортопркатних валків припустимо розглядати як результат взаємодії шару вибіленого чавуну на циліндричній поверхні сірого чавуну. При цьому цю конструкцію розглядати, як взаємодію незалежних між собою елементів з вибіленого та сірого чавуну, які мають між собою чітко виражену межу розподілу. При такому припущенні величину залишкових усадкових напружень в бочці сортопркатних валків можливо розглядати, як один з варіантів вирішення задачі Ламе при гарячому посаді труби на стрижень, що схематично надано на рис. 1.3.



1 – білий чавун; 2 – сірий чавун

Рисунок 1.3 – Умовна схема для розрахунку усадкових напружень

У цьому випадку величину залишкових напружень між робочим (вибілений чавун) шаром і серцевиною (сірий чавун) валка розраховуємо за формулою контактного напруження порожнистих циліндрів при гарячому посаді [51]:

$$P_k = \frac{\frac{\Delta}{2}}{\frac{c}{E_I} \left(\frac{c^2 + a^2}{c^2 - a^2} - \mu_I \right) + \frac{c}{E_{II}} \left(\frac{b^2 + c^2}{b^2 - c^2} + \mu_{II} \right)}, \quad (1.3)$$

де Δ – натяг;

c – радіус сірого чавуну в бочці, м;

E – модуль пружності, МПа;

a – внутрішній радіус отвору в шарі вибіленого чавуну, м;

μ – коефіцієнт Пуансона;

b – радіус бочки валка, м.

Аналіз формул (1.2) та (1.3) показує, що величина фазових залишкових напружень знижується в основному зі зменшенням кількості другої та третьої фаз в структурі охолодженого чавуну і наближення співвідношення коефіцієнтів термічного лінійного розширення фаз та основи сплаву до 1. Залишкові усадкові напруження відповідно до (1.3) зменшуються при зменшенні величини натягу та товщини вибіленого шару.

1.3 Усадкові раковини і пухкість в сортопрокатних валках

1.3.1 Способи попередження виникнення усадкових раковин і пухкості у валках, які виготовляють на підприємствах України

При виготовленні вибілених валків, бочка яких формується в забарвленому вогнетривкою фарбою кокілі, раковини і пухкості, як правило,

виникають в тих випадках, коли при заливці надливна частина форми виявляється не повністю заповненою або її об'єм не відповідає розмірам валка. У разі виробництва дрібних і середніх по масі вибілених валків з короткою бочкою (до 1200 мм) і відносно товстою шийкою, надлив, як правило, заповнюють повністю. Для успішної роботи надливу в таких випадках надливну надставку просушують і заздалегідь нагрівають до температури не менше 80 °С. У міру твердіння чавуну у формі у ряді випадків надливну надставку доливають добре перегрітим чавуном. Надливи великих валків масою більше 25 т, окрім доливання вихідним чавуном, так само підживлюють чавуном з вмістом 3,4% С і 0,8-1,0% Si, який додають в надливну надставку через 1...1,5 години з температурою не менше 1350 °С [52].

У разі лиття вибілених валків з чавуну з кулястим графітом (ЧКГ) розмір надливу в ливарній формі збільшують, що обумовлено більшою об'ємною усадкою цього чавуну у порівнянні з сірим чавуном.

Надлив великотоннажних валків, як правило, доливають перегрітим первинним чавуном вже через 20 хвилин після закінчення заливки, а надалі ще 2...4 рази через кожні 30...40 хвилин до повного твердіння розплаву в надливі. Після кожної доливки дзеркало розплаву в надливі утеплюють вогнетривким матеріалом утеплювача. На деяких підприємствах замість утеплювача практикують електрообігрів надливу.

Для валків з шийками, які вирізують з бочки по закінченні заливки форми надлив надалі не доливають, щоб уникнути заклинювання виливка у формі в результаті попадання розплаву в проміжок між стінкою кокілю і валка. Проте, надлив таких валків утеплюють деревним вугіллям, що попереджує попадання в проміжок між валком і кокілем фосфідної евтектики, яка вичавлюється з серцевини надливу в процесі лінійної усадки матеріалу валка.

При литті сталевих валків використовують надливи значно більших розмірів, ніж для чавунних валків. Це обумовлено значно більшою величиною об'ємної усадки сталі, особливо легованих хромом, нікелем і молібденом. З метою підвищення ефективності роботи надливів в таких валках у форму нижньої шийки встановлюють масивні холодильники. В якості холодильників використовують чавунні пластини, які розташовують по колу шийки і заздалегідь покривають теплоізоляційним матеріалом завтовшки 15...20 мм.

Зменшенню об'єму усадкових дефектів і розмірів використовуваних надливів сприяє тривала заливка розплаву у валок через надлив. При цьому розплав повинен мати мінімально припустиме перегрівання. У таких випадках усадкова раковина стає концентрованою і не виходить за межі надливу. На деяких підприємствах робочі поверхні надливу оформлюють екзотермічними сумішами з наступним утепленням дзеркала розплаву. При використанні нижнього підведення розплаву (через нижню шийку), форму заповнюють на 100...150 мм вище верхнього трефа з наступною доливною цієї ж сталі через надлив з її подальшим утепленням.

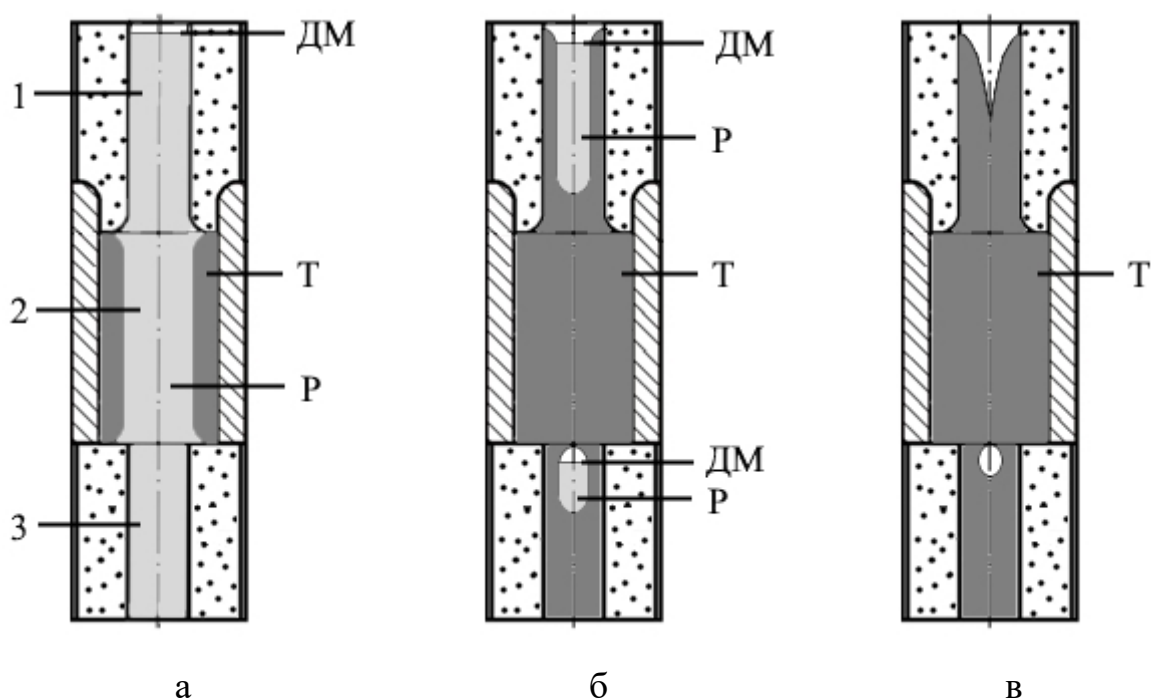
Проте, не дивлячись на більшу різноманітність вживаних способів і матеріалів валків, що забезпечують достатнє живлення, проблема виникнення усадкової раковини у сполученні нижньої шийки і бочки на сьогодні залишається не вирішеною, оскільки усі наведені вище заходи спрямовані лише на попередження виникнення усадкових дефектів в бочці і верхній шийці валка.

1.3.2 Причини утворення усадкових раковин і пухкості у валках

Причиною утворення будь-якого усадкового дефекту у вигляді усадкової раковини відкритого або закритого типу, пухкості, усадкової пористості є припинення живлення фронту кристалізації від об'ємів рідкого

металу, що сполучаються з цим елементом виливка. Тобто для отримання виливка без усадкової раковини і пухкості повинна виконуватися умова послідовності твердіння усіх елементів виливка від нижнього до його верхнього елемента і надливу на ньому [16, 32, 50, 53-64].

Стосовно сортопрокатних валків, що виготовляються в комбінованих ливарних формах, етапи виникнення усадкових раковин сполучень нижньої шийки з бочкою валка можна пояснити схемою, представленою на рис. 1.4.



1 – верхня шийка валка; 2 – бочка валка; 3 – нижня шийка валка;

ДМ – дзеркало металу; Р – розплав; Т – тверда фаза;

а – вихідний стан; б – утворення усадкової раковини; в – кристалізація замкнутого об'єму розплаву в тепловому вузлі

Рисунок 1.4 – Схеми етапів твердіння реального сортопрокатного валка

Відповідно до рис. 1.4, а перший етап твердіння характеризується інтенсивним ростом твердої фази по периметру бочки. Це обумовлено тим, що цей елемент валка оформлений чавунним кокілем – матеріалом з дуже великим коефіцієнтом теплоакumuлюючої здатності. На рис. 1.4, б

представлений момент часу, в якому завершився процес кристалізації чавуну у бочці. Цей етап характеризується виникненням у валку, який твердіє, двох термічних вузлів – в нижній і верхній шийці. Причиною утворення цих термічних вузлів є знижена інтенсивність теплопередачі від розплаву в шийках до піщаних форм, які мають величину коефіцієнта теплоакumuлюючої здатності в 4...5 разів меншу, ніж твердий чавун. Тобто відмінність в діаметрах бочки і шийок в даному випадку була знівельована різницею у величині коефіцієнтів теплоакumuлюючої здатності елементів форми, в яких формуються бочка і шийки. В результаті цього, в шийках валка залишаються об'єми розплаву, які у випадку з нижньою шийкою не живляться, а у разі верхньої шийки, живляться з надливу.

Як результат нестача живлення розплаву, що твердіє, в нижній шийці призводить до виникнення усадкової раковини в області сполучення бочки і нижньої шийки. В той же час живлення від надливу верхньої шийки забезпечує отримання цього елемента вилівка без усадкової раковини і пухкості, що схематично представлено на рис. 1.4, в.

Тобто, за цієї конструкції і технології охолодження розплаву у формі по відношенню до нижньої шийки не виконується умова послідовного твердіння елементів валка, а саме:

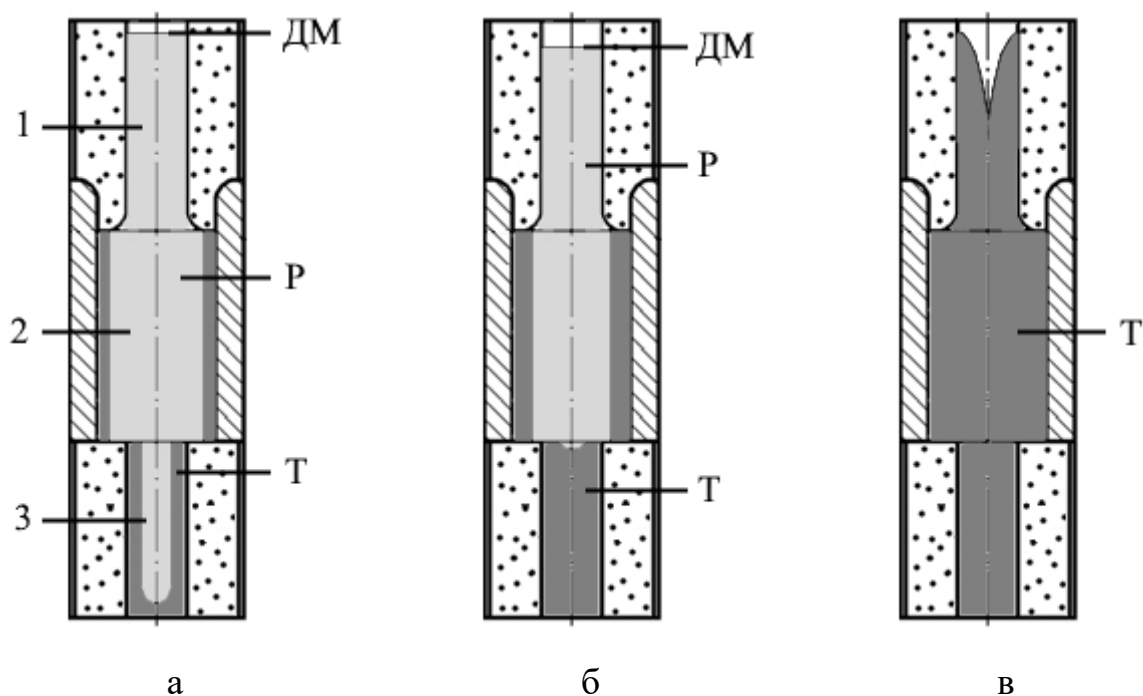
$$\tau_{\text{надлив}} > \tau_1 > \tau_2 < \tau_3, \quad (1.4)$$

де τ_1 , τ_2 , τ_3 , $\tau_{\text{надлив}}$ – час твердіння, відповідно, верхньої шийки, бочки, нижньої шийки і надливу валка.

З метою попередження виникнення усадкових дефектів в сортопрокатному валку необхідно забезпечити умову твердіння його розплаву, при якому:

$$\tau_{\text{надлив}} > \tau_1 > \tau_2 > \tau_3. \quad (1.5)$$

В цьому випадку етапи затвердіння сортопрокатного валка будуть відповідати схемі, яка представлена на рис. 1.5.



1 – верхня шийка валка; 2 – бочка валка; 3 – нижня шийка валка;

ДМ – дзеркало металу; Р – розплав; Т – тверда фаза;

а – вихідний стан; б – утворення усадкової раковини; в – кристалізація замкнутого об'єму розплаву в тепловому вузлі

Рисунок 1.5 – Схеми етапів послідовного твердіння сортопрокатного валка

Нині існує велика різноманітність способів виконання умови послідовного твердіння виливків. Зокрема шляхом: створення підвищеного (поршневого, газового, металостатичного) тиску на розплав виливка, що твердіє [65], зміною конструкції виливка [66], утепленням надливу [67], електрошлаковим обігрівом надливу [68, 69], використанням ливарної форми з різною величиною теплоакумулюючої здатності по її висоті [50], використанням надливів і живильників збільшених розмірів [50], установкою холодильників на термічних вузлах [50], розширенням інтервалу

кристалізації сплаву для перетворення раковини, пухкості в розсіяну усадкову пористість [50, 70], зниження коефіцієнта об'ємної усадки розплаву шляхом пониження температури заливки і коригування хімічного складу сплаву в межах його марки [50], підвищення швидкості заливки форми [50], збільшення числа центрів кристалізації розплаву шляхом введення металевих порошків і дроту в розплав, вібрацією розплаву тощо [71, 72], підвищення термічного опору форми за рахунок штучного створення газового проміжку між виливком і формою [73, 74], зміна місця підведення розплаву у форму [50, 72].

Перелічені вище способи здебільшого спрямовані на виконання умови послідовного твердіння елементів виливка теплофізичними діями. З цієї точки зору стосовно нижньої шийки валка можна скористатися аналітичними виразами Г.А. Анісовича [73].

Оскільки бочка валка твердне в кокілі, тоді тривалість її твердіння (τ_6) у відповідність з [73] можна розрахувати за наступною формулою:

$$\tau_6 = \frac{\rho_1 c_1 (\xi - \xi_1)}{\beta (\vartheta_{1\text{cp}} - \vartheta_{2\text{cp}})} \left[\frac{q_{\text{кр}}}{c_1} \left(1 - \frac{\delta + \delta_1}{2} \right) + \frac{\vartheta_{\text{кр}} - \vartheta_1}{n_1 + 1} \left(1 - \frac{\delta + \delta_1}{n_1 + 2} \right) \right] + \tau_1, \quad (1.6)$$

де ρ_1 – густина твердого метал, кг/м³;

c_1 – питома теплоємність твердого металу, Дж/кг·град;

$\xi - \xi_1$ – товщина твердої кірки металу, м;

β – термічна провідність зазору, Вт/м²·град;

$\vartheta_{1\text{cp}}$ – середня температура твердого металу, град;

$\vartheta_{2\text{cp}}$ – середня температура матеріалу форми, град;

$q_{\text{кр}}$ – повна ефективна теплота кристалізації, Дж/кг;

R – половина товщини виливка, м;

$\delta - \xi/R$;

$$\delta_1 - \xi_1/R;$$

$\mathcal{G}_{\text{кр}}$ – температура кристалізації, град;

$\mathcal{G}_1$ – температура твердого металу, град;

n_1 – величина показника ступеня параболи розподілу температури по товщині шару затверділого металу в виливку;

τ_1 – час течії металу (заповнення форми розплавленим металом), с.

У цьому випадку тривалість затвердіння нижньої шийки ($\tau_{\text{ниш}}$) валка можна розрахувати за формулою [73]:

$$\tau_{\text{ниш}} = \frac{R^2(n+2)^2}{12n(n+1)a_2}(1+A)B^2 \left[\left(1 + 2 \frac{n+1}{n+2} \cdot \frac{q_{\text{кр}}\rho_1}{\rho_2 c_2 \theta_{\text{п min}}} \cdot \frac{1}{B} \cdot \frac{1}{1+A} \right)^{3/2} - 1 \right] - \frac{n+2}{4n} \cdot \frac{q_{\text{кр}}\rho_1 R^2}{\lambda_2 \theta_{\text{п ср}}}, \quad (1.7)$$

де n – показник ступеня параболи;

a_2 – коефіцієнт температуропровідності матеріалу форми, $\text{м}^2/\text{с}$;

A – параметр;

B – параметр;

ρ_1 – густина твердого металу, $\text{кг}/\text{м}^3$;

ρ_2 – густина матеріалу форми, $\text{кг}/\text{м}^3$;

c_2 – теплоємність матеріалу форми, $\text{Дж}/\text{кг} \cdot \text{град}$;

$\theta_{\text{п min}}$ – мінімальна температура матеріалу форми, град;

λ_2 – теплопровідність матеріалу форми, $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{град}$;

$\theta_{\text{п ср}}$ – середня температура матеріалу форми, град.

Виходячи з наведених формул умовою попередження виникнення усадочної раковини і пухкості в сполученні нижньої шийки і бочки є виконання умови:

$$\tau_6 > \tau_{\text{нш}}. \quad (1.8)$$

Виконання даної умови можна домогтися або підвищенням величини τ_6 при незмінному $\tau_{\text{нш}}$, або зменшенням $\tau_{\text{нш}}$ при незмінному τ_6 , або підвищуючи τ_6 при одночасному зниженні $\tau_{\text{нш}}$.

Виходячи із структури формул (1.6) і (1.7) величину часу можна підвищити шляхом зменшення теплоакумуючої здатності матеріалу кокілю, або шляхом підвищення термічного опору кокілю (нанесенням вогнетривкої фарби на внутрішню поверхню кокілю, створенням повітряного зазору між поверхнею виливка і кокілю, зниженням перепаду температур між внутрішньою і зовнішньою поверхнями стінок кокілю).

У нижній шийці збільшити швидкість її твердіння можливо лише шляхом збільшення теплоакумуючої здатності матеріалу форми.

Стосовно лиття сортопрокатних валків з числа можливих способів дії і управління швидкістю твердіння бочки і шийки найбільш прийнятними є способи управління термічним опором проміжку між виливком і кокілем. Зокрема, цей варіант управління процесом твердіння валків був реалізований авторами [74]. Відповідно до способу [74] термічний цикл охолодження бочки, що кристалізується, змінюють шляхом первинного заповнення алюмінієм в проміжку між бочкою і кокілем і наступного випуску рідкого алюмінію з проміжку в певний момент часу. Це дозволяє знизити теплопровідність проміжку в 1000 разів, що відповідно підвищує його термічний опір. На думку [75] це технічне рішення сприяє зниженню залишкових напружень і порівняно з результатом проведення низькотемпературного релаксаційного відпалу валка. В той же час окрім зниження рівня залишкового напруження у валку, це рішення також сприяє і попередженню утворення усадкових дефектів в нижній шийці валка, що виходить з аналізу формул (1.6) і (1.7). Недоліком цього технічного рішення є технічна складність його реалізації, починаючи з моменту заповнення

проміжку розплавом рідкого алюмінію і до моменту його випуску з проміжку.

Виходячи з викладеного вище для управління кінетикою твердіння сортопрокатних валків найбільш прийнятним і таким, що технічно просто реалізовується, є використання зовнішньої дії на умови теплопередачі із зовнішньої поверхні кокілю. Проте, на сьогодні відсутні дані про час початку такої дії, її теплову ефективність, вплив на структуру чавуну у бочці тощо.

1.4 Мета і завдання дослідження

Мета – зниження собівартості, циклу виробництва і підвищення надійності сортопрокатних валків виконання СПХН-60 за рахунок зменшення в них залишкових ливарних напружень, а також усадкових раковин в області сполучення бочки і нижньої шийки валків.

Завдання:

1. Встановити ефективність і закономірності впливу екранування зовнішньої поверхні кокільної частини форми на швидкість охолодження, величину залишкових напружень, розподіл хімічних елементів і мікроструктуру чавуну у бочці валка.

2. Дослідити вплив модифікування валкового чавуну СПХН-60 модифікаторами і лігатурами, які містять РЗМ, а також термічного оброблення на структуру чавуну, механічні властивості, термостійкість, зносостійкість і величину залишкових напружень у чавуні.

3. Розробити параметричний критерій оцінки рівня послідовності твердіння чавуну в системі нижня шийка – бочка сортопрокатних валків з бочкою діаметром 300...500 мм, та дослідити комплексний вплив теплофізичних і розмірних параметрів комбінованої ливарної форми сортопрокатних валків на послідовність твердіння чавуну у формі.

4. Встановити закономірність між часом початку екранування зовнішньої поверхні кокілю ливарної форми і діаметром бочки валка.

5. Провести дослідно-промислову перевірку розробленої технології, дослідити якість і властивості теплоізовованого і серійного валка з однаковим діаметром бочки Ø390.

1.5 Висновки

За результатами проведеного аналізу встановлено, що для даного об'єкта досліджень цієї роботи, виходячи з вимог, які пред'являються до сортопрокатних валків, в числі припустимих способів зменшення їх напруженого стану є зменшення швидкості затвердіння чавуну, що призводить до зменшення модуля його пружності, зменшення коефіцієнта термічного лінійного розширення і в сукупності зменшує залишкові напруження в виливку. Для управління кінетикою твердіння сортопрокатних валків найбільш прийнятним і такий, що технічно просто реалізується, це – використання зовнішньої дії на умови теплопередачі із зовнішньої поверхні кокілю.

Матеріали розділу опубліковано у [76, 77, 78].

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Матеріали

Для виплавки чавуну для прокатних валків виконання СПХН-60 ТУ У 28.9-00187375-106:2018 використовували шихтові матеріали, марки і хімічний склад яких приведений в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 - Хімічний склад шихтових матеріалів

Назва матеріалу	Марка	Нормативний документ	Вміст хімічних елементів, мас.%				
			C	Si	Mn	P	S
Чавун переробний	ПЛ2	ДСТУ 3133-95 (ГОСТ 805-95)	4,0...4,5	0,5...0,9	0,9...1,5	до 0,08	до 0,03
Брухт сталевий	№1	ДСТУ 4121-2002	0,25	0,25	0,3	до 0,05	до 0,05
Повернення	—	—	3,5...3,7	0,70...1,10	0,4...0,71	до 0,30	до 0,03
Феросиліцій	ФС75	ДСТУ 4127:2002	до 0,2	74...80	до 0,5	до 0,05	до 0,02
Феромарганець	ФМн70	ДСТУ 3547-97	до 7,0	до 6,0	65...75	до 0,30	до 0,03
Ферохром	ФХ800А	ГОСТ 4757-91	до 8,0	до 2,0	—	до 0,03	до 0,06
Нікель	Н-1	ГОСТ 849-2008	до 0,01	до 0,002	—	до 0,001	до 0,001
Феротитан	ФТи70С1	ДСТУ ГОСТ 4761:2009	до 0,4	до 1,0	—	до 0,05	до 0,05
Модифікатор1	КМг9	ДСТУ 3362-96	—	40-55	—	—	—
Модифікатор2	СРЗМ30 [79]	—	до 1,0	до 65	—	—	—

Назва	Вміст хімічних елементів, мас.%								
	Al	Cr	Ni	Ti	Cu	PЗМ	Ca	Mg	Fe
Чавун переробний	—	до 0,04	—	—	—	—	—	—	решта
Брухт сталевий	—	—	—	—	—	—	—	—	решта
Повернення	—	до 0,7	до 1,2	—	—	—	—	—	решта
Феросиліцій	до 3,0	до 0,5	—	—	—	—	—	—	решта
Феромарганець	—	—	—	—	—	—	—	—	решта
Ферохром	—	понад 65	—	—	—	—	—	—	решта
Нікель	—	—	понад 99,93	—	до 0,02	—	—	—	до 0,02
Феротитан	5	—	—	65-75	—	—	—	—	решта
Модифікатор1	до 2,5	—	—	—	—	0,3-1	0,2-1	8-10	решта
Модифікатор2	до 3,0	—	—	—	—	30-35	—	—	решта

Для екранування ливарної форми використовувалася тканина конструкційного призначення (скловолокно) марки Т-13 по ГОСТ 19170-2001.

2.2. Плавка і розливання чавунів

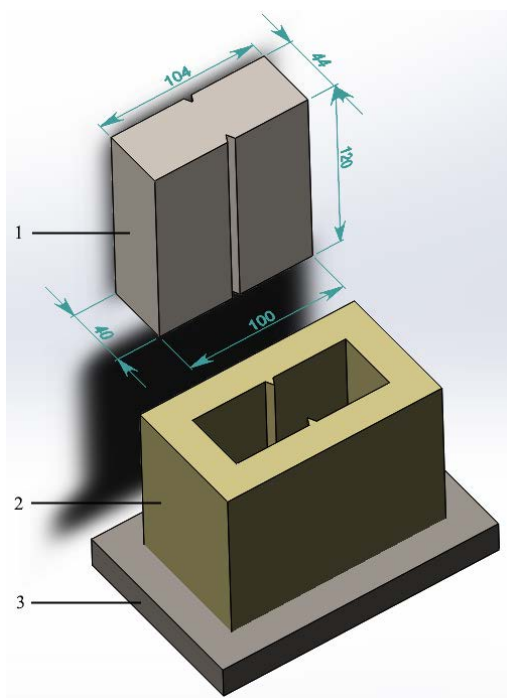
Лабораторні плавки проводили в індукційній тигельній електропечі моделі ИТПЭ–0.03/0.05 ТМ 1 металоємністю 30 кг, високочастотній індукційній печі ЛПЗ–67М металоємністю 50 кг, а також силітовій печі з металоємністю тиглю 0,2 кг (по чавуну). Переплавлення валкових чавунів здійснювали з застосуванням приладу ВДТА-8М.

Промислові плавки чавунів проводили в індукційній печі моделі ІЧТ–6 у вальцеливарному цеху АТ «ДЗПВ». Відповідно до прийнятої у вальцеливарному цеху технології після розплавлення шихтових матеріалів в печі і доведення розплаву чавуну по хімічному складу проводили його нагрів до 1450 ± 5 °С, після чого піч відключали і після певної витримки розплав випускали в ківш поворотного типу металоємністю 6 т. Заливку розплаву у форми проводили при температурі розплаву чавуну 1320 ± 5 °С.

Оцінку якості металу, виплавленого в умовах вальцеливарного цеху, проводили по технологічній пробі, схема якої представлена на рис. 2.1.

Для заливки піщано–глинисту форму проби, встановлювали на плиту з сірого чавуну з розмірами 200x200x50 мм. Після заливки, на дзеркало розплаву в порожнині форми насипали суху формувальну суміш. Витримку проби у формі і її охолодження після вибивання проводили по наступному режиму:

- охолодження у формі – 8 хв;
- охолодження на повітрі – 2...3 хв;
- охолодження шляхом періодичного занурення у воду – 1...2 хв.



1 – клиновидна проба; 2 – піщано–глиниста форма; 3 – чавунна плита

Рисунок 2.1 – Схема проби на вибіл для оцінки якості розплаву

Охолоджену до кімнатної температури пробу розламували уздовж її технологічної канавки. Після цього, використовуючи лінійку, визначали відстань від торця проби до межі вибіленого шару в її макроструктурі. Межею вибіленого шару вважали наявність трьох чорних точок в її структурі.

Порядок лабораторної плавки. Компоненти шихти зважували на електронних вагах MW – 1200 з точністю $\pm 0,1$ г.

Компоненти шихти завантажували в тигель плавильної печі, включали піч на повною потужність. Після розплавлення шихти розплав нагрівали до 1500 ± 7 °C і витримували його при цій температурі впродовж 4...6 хвилин. Після ізотермічної витримки відключали піч і проводили обробку розплаву модифікуючими сумішами. Після пониження температури розплаву до 1340 ± 5 °C здійснювали його заливку в кокіль і піщану форму з розмірами робочої порожнини $\varnothing 50 \times 200$ мм.

2.3. Термічний аналіз

Швидкість твердіння і охолодження чавуну визначали за результатами розрахунку, використовуючи термограми, отримані в результаті виміру температури виливка.

Для виміру температури використовували хромель-алюмелеві (ХА) датчики температури в комплекті з потенціометром КСП-4 і вимірника температури восьмиканального типу РегМик И8 8ТС/10К-[RS458]-ИПИ(ИПК)-Щ, що забезпечувало точність визначення температури з похибкою $\pm 12,5$ °С. В роботі використовували ХА термопари з діаметром електродів 0,5 мм без використання компенсаційних дротів, ізольовані один від одного двокаанальною високоглиноземистою соломкою. Робочі спаї термопар захищали кварцовими наконечниками, які утримувалися чохлами відповідно до рис. 2.2.

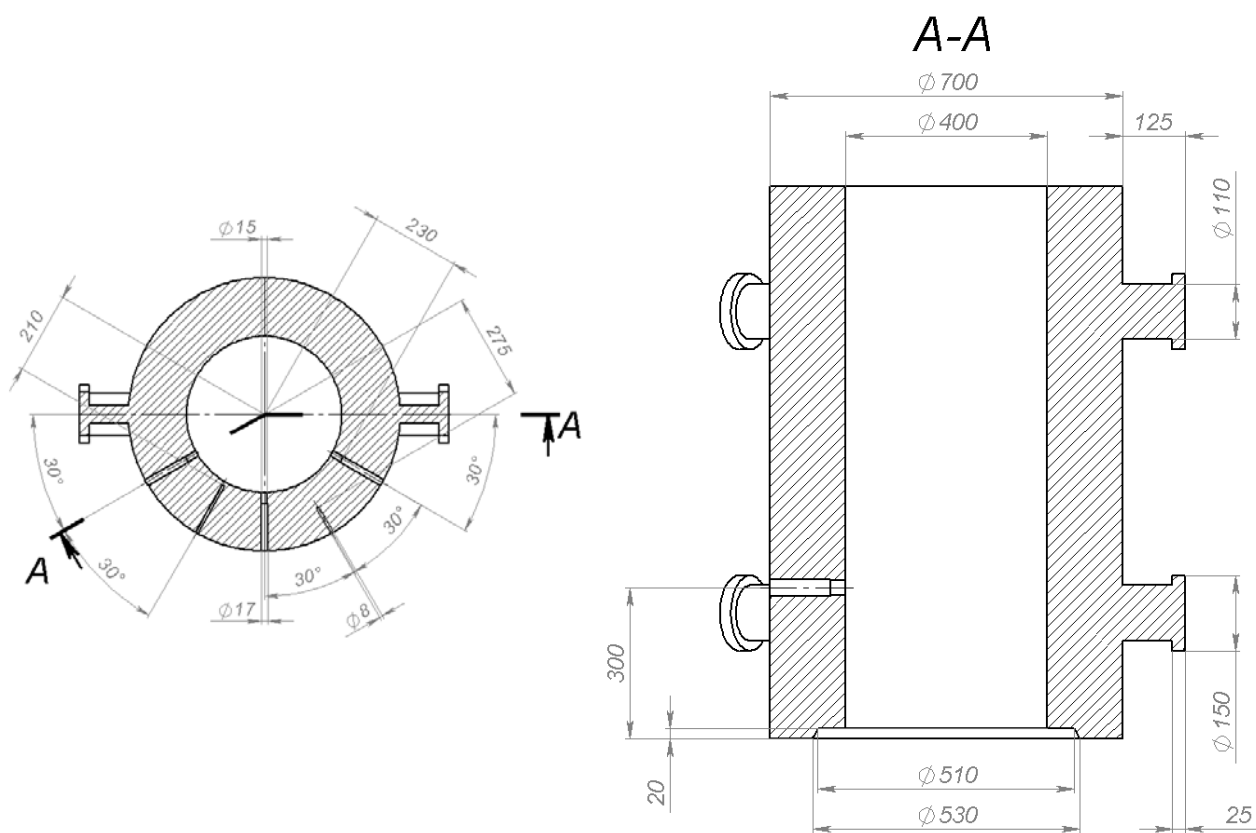


Рисунок 2.2 – Схема розташування направляючих отворів у кокілі для введення датчиків температури

2.4 Визначення величини залишкових напружень у валках

Залишкові напруження у валках оцінювали величиною коерцитивної сили, яку визначали з використанням магнітного структуроскопа SA51–Hc–001 за схемою, представленою на рис. 2.3.

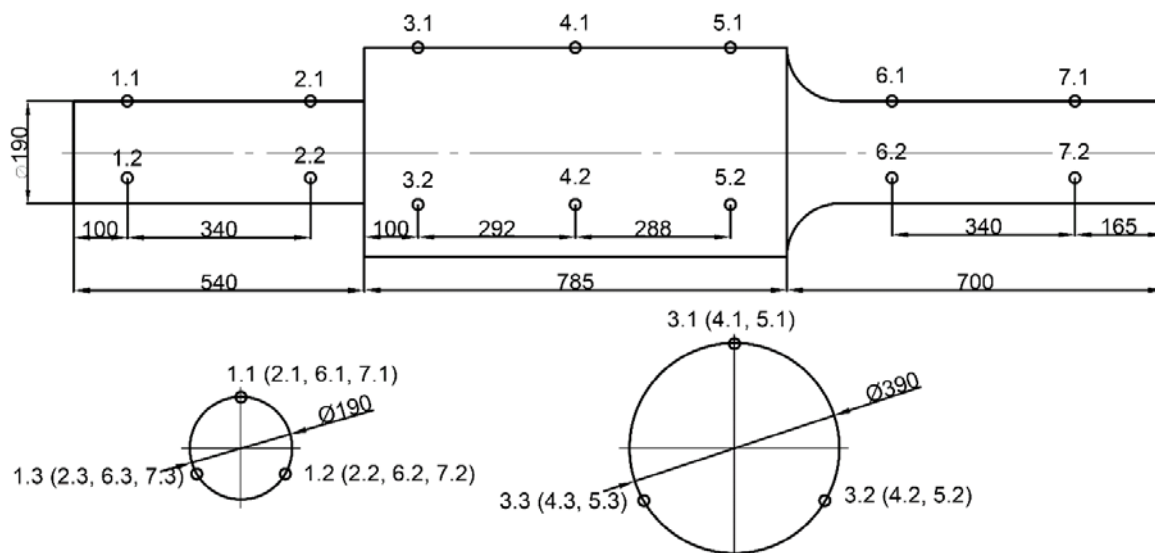


Рисунок 2.3 – Схема розташування контрольних точок для вимірювання величини коерцитивної сили (залишкових ливарних напружень) у валку

На рис. 2.3 вимірювання коерцитивної сили проводили в точках, які на схемі позначені відповідними цифрами. Данна схема прийнята відповідно до вимог до сортопрокатних валків на підприємстві АТ «ДЗПВ».

2.5 Термічне оброблення

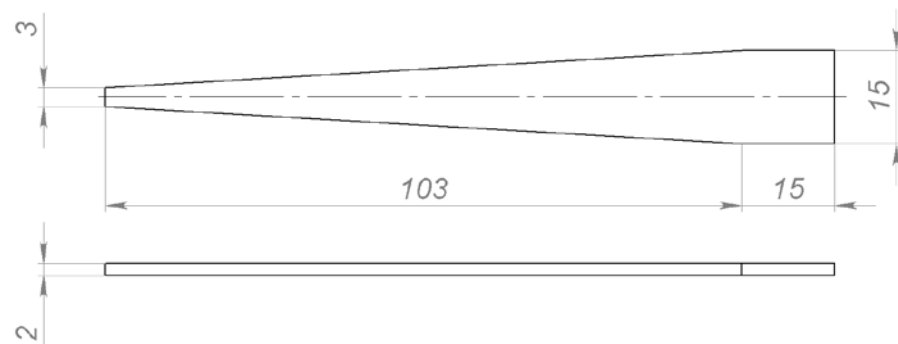
Термічну обробку зразків проводили в муфельній печі, оснащній системою автоматики.

Для позиційного регулювання нагріву та охолодження за заданою програмою використовували автоматичне електронне програмне регулюючий пристрій моделі РУ5–01М в комплекті з автоматичним вимірювальним приладом типу ПСР–08м.

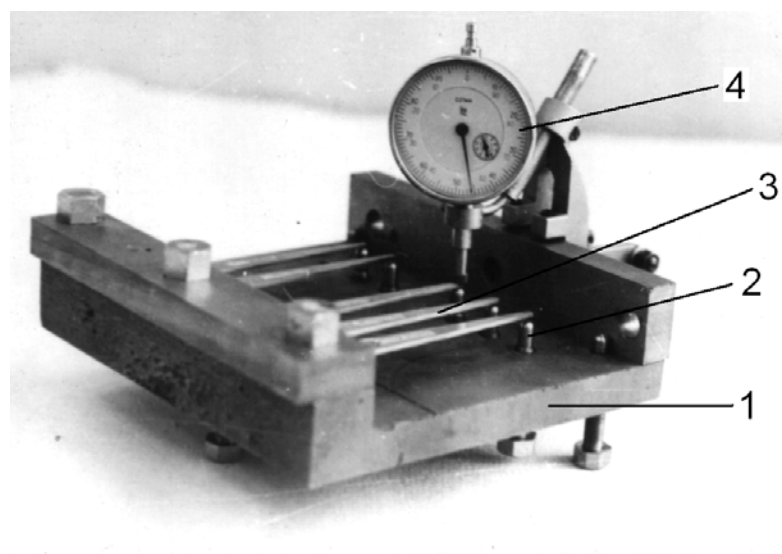
У промислових умовах термічну обробку валків проводили в печах камерного типу з висувним подом по режиму наведеному в табл. 1.1.

2.6 Визначення схильності чавуну до зняття залишкових напружень термічним обробленням

Випробування проводили на зразках, вирізаних з темплетів від нижнього торця бочок серійних і дослідних валків, з використанням пристосування, представленого на рис. 2.4 [80].



а



б

1 – станина, 2 – навантажувальні гвинти, 3 – зразки, 4 – індикатор

Рисунок 2.4 – Схема зразка (а) і вид установки (б) для вимірювання деформації зразків [80]

Дослідження проводили за методикою роботи[80].

Релаксаційне відпалювання проводили за режимом:

- нагрівання зі швидкістю 25 град/год до 600 ± 5 °С;
- ізотермічна витримка 1 год;
- охолодження зі швидкістю 25 град/год до 20 °С.

Вимір деформацій до та після відпалу проводили за допомогою індикатора часового типу з ціною поділки 0,01 мм.

2.7 Підготовка зразків для проведення досліджень

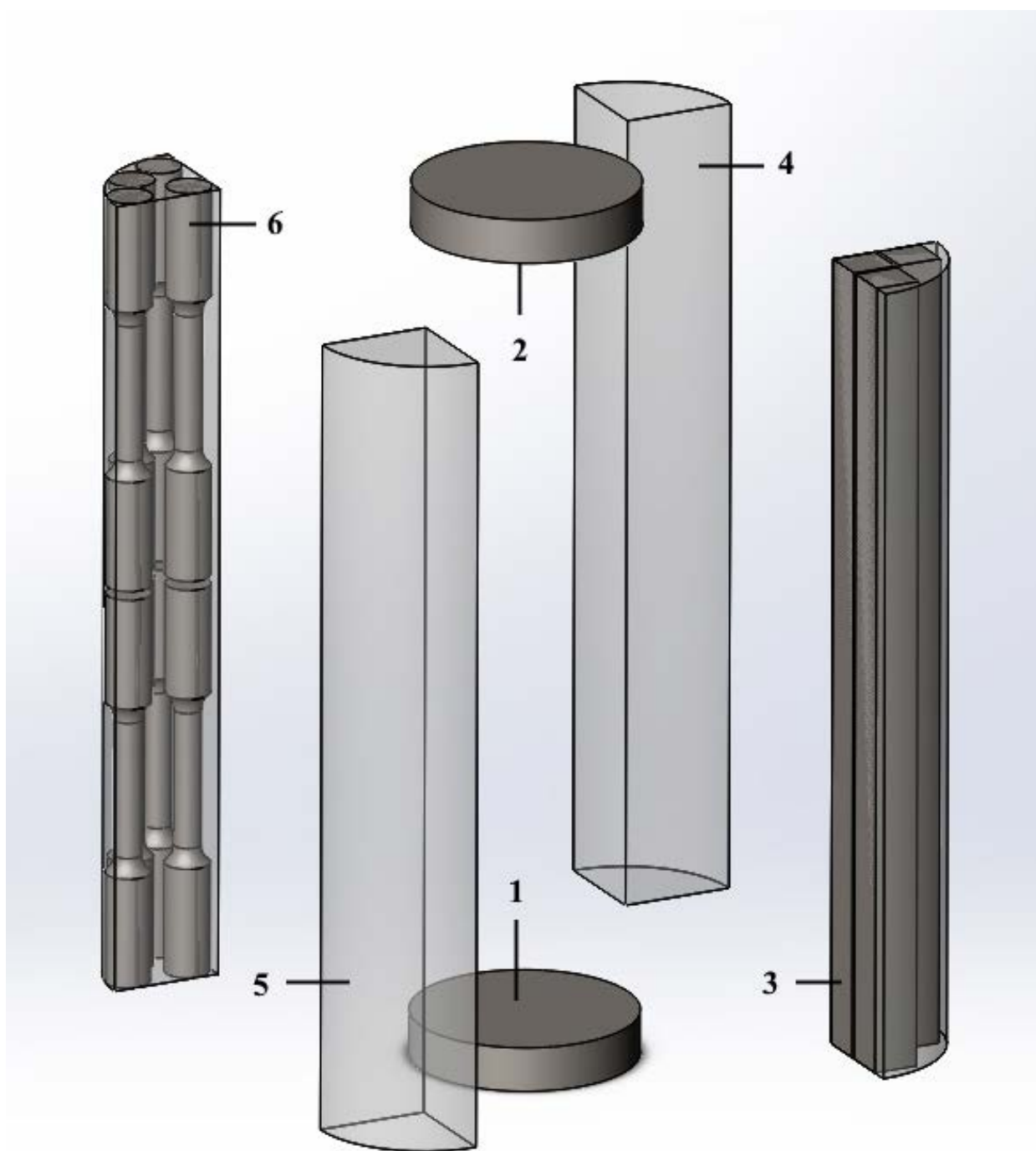
У лабораторних умовах дослідні зразки розрізали за схемою, представленою на рис. 2.5.

Для проведення хімічного аналізу, визначення твердості, дослідження макро- і мікроструктур литого металу в промислових умовах з двох валків (дослідного і відлитого за серійною технологією) вирізали диски товщиною 20 мм за схемою, що представлена на рис. 2.6.

2.8 Зняття сірчаних відбитків з дисків чавунного прокатного валка

Два прокатних валка однакової маси в однакових умовах з високоміцного чавуну розрізали на диски і поздовжні темплети, поверхню яких шліфували.

Сірчані відбитки знімали за методом Баумана, звичайний нефіксований фотопапір при денному світлі просочували сірчаною кислотою (5%) протягом 20...30 хв. Поверхню макрошліфу очищали від забруднень тампоном, змоченим спиртом, після чого фотопапір притискали емульсійним шаром до досліджуваної поверхні. Кінці фотопаперу фіксували по краях чавунних зразків за рахунок їх перегину, а виникаючі газові бульбашки в



1, 2 – зразки для визначення хімічного складу; 3 – зразки для визначення тимчасового опору при вигині і зносостійкості, 4 – зразки для визначення твердості, термостійкості і металографічних досліджень; 5, 6 – зразки для визначення тимчасового опору при розтягуванні і відносного подовження

Рисунок 2.5 – Схема розрізання дослідного зразка Ø50x200 мм

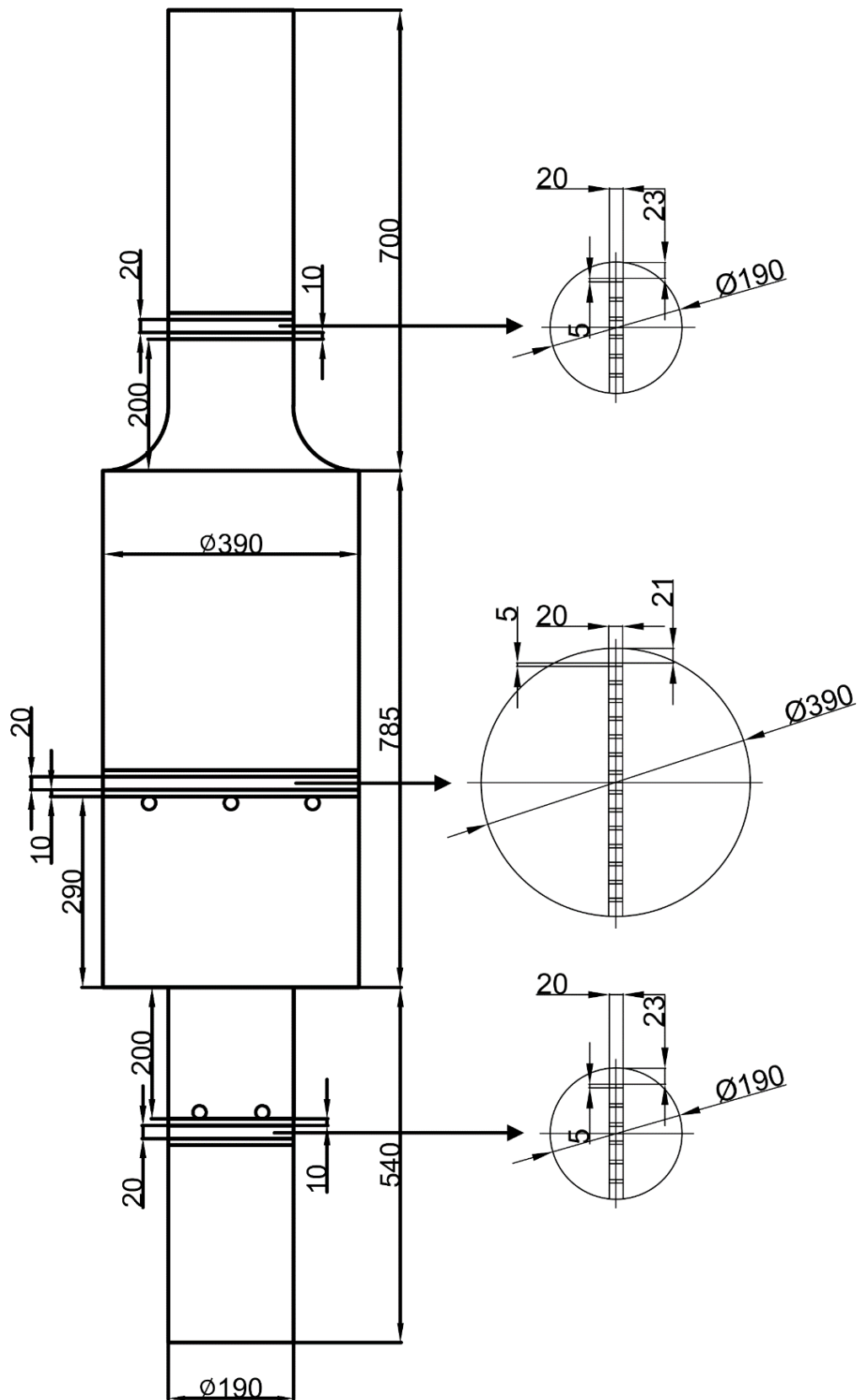


Рисунок 2.6 – Схема вирізки зразків з валків

результаті виділення водню виштовхували на поверхню зразка за допомогою тампона, змоченого в розведеній сірчаній кислоті. При цьому стежили, щоб фотопапір під час хімічної реакції залишався в тісному контакті з поверхнею зразка. Тривалість зняття сірчаного відбитка становила 7...15 хв.

Отриманий відбиток промивали від кислоти в кюветі проточною водою, а потім переносили в кювету з фіксажем. Через 20 хв фотопапір знову промивали в проточній воді і сушили на повітрі.

2.9 Хімічний аналіз

Зразки для визначення хімічного складу чавуну вирізали з дисків за схемою, представленою на рис. 2.6. У чавуні визначали вміст кремнію, марганцю, фосфору, сірки, хрому, нікелю, молібдену та міді спектральним методом за допомогою оптичного вакуумного спектрометра моделі «GDS–500A» фірми LECO, призначеного для визначення хімічного складу чавуну при контролі готової продукції, вхідному контролі та контролі технологічних процесів поза сферою поширення державного метрологічного контролю та нагляду.

Вміст вуглецю в чавуні визначали хімічним методом відповідно до ГОСТ 2604.1-77.

2.10 Металографічний аналіз

Зразки для дослідження мікроструктури вирізали згідно схеми (див. рис. 2.5, 2.6).

Мікроскопічне дослідження матеріалу валків проводили на оптичних металомікроскопах моделей МІМ–8М і «Neophot 21» при збільшеннях 100...1300. Шліфи досліджували до і після травлення. В якості основного

травника використовували 4%–ний розчин азотної кислоти в етиловому спирті (ніталь).

Кількість структурних складників визначали за допомогою комп'ютерної програми «Quick PHOTO Industrial 2.1» від приставки цифрової камери «Ueye» до мікроскопа «Neophot 21», що забезпечувало абсолютну похибку менше 1%.

Оцінку структури валкових чавунів проводили за ГОСТ 3443-87.

2.11 Визначення твердості, міцності і зносостійкості чавуну

Зразки для дослідження фізико-механічних властивостей вирізали згідно схеми (див. рис. 2.5, 2.6).

Для визначення твердості використовували прилад Роквелла за ГОСТ 9013-59, оснащений алмазним конусом з кутом при вершині $120^{\circ} \pm 30$ (шкала С). Визначення твердості по Брінеллю проводили за ДСТУ ISO 6506-1:2007 на приладі марки ТШ–2м, оснащеного сталевією кулькою діаметром 10 мм при навантаженні 29420 Н. Величину твердості розраховували, як середнє значення зміни маси зразка за результатами випробувань 5 вимірів.

Для визначення мікротвердості (Нм) структурних складників чавунів використовували прилад моделі ПМТ-3 відповідно до ГОСТ 9450-76. У процесі випробувань навантаження на зразок становила 0,49 Н, а збільшення 487. Прийняті умови виміру діагоналі відбитка забезпечували величину похибки до 0,07 мкм. Значення мікротвердості визначали за результатами розрахунку як середнє значення 25 вимірів.

Тимчасовий опір при розтягуванні і відносне подовження чавуну визначали за ГОСТ 1497-84 на зразках Ø6 мм (тип III). Тимчасовий опір при вигині оцінювали на зразках з розмірами 10x10x55 мм відповідно до ГОСТ 1497-84 і ГОСТ 14019-80. Випробування проводили на машині МУП-50.

Величини меж міцності розраховували як середню за результатами випробувань трьох зразків.

Зносостійкість дослідних чавунів оцінювали за способом тертяковзання, який був реалізований на машині СМЦ-2. У дослідженнях використовували зразок у вигляді колодки (див. рис. 2.7) з розмірами 10x10x10 мм і чистотою тертьової поверхні Ra1,60. В якості контрольного зразка використовували диск зі сталі Ст3сп ДСТУ 2651: 2005 з чистотою робочої поверхні Rz50. Спосіб визначення зносостійкості схематично представлено на рис. 2.7.

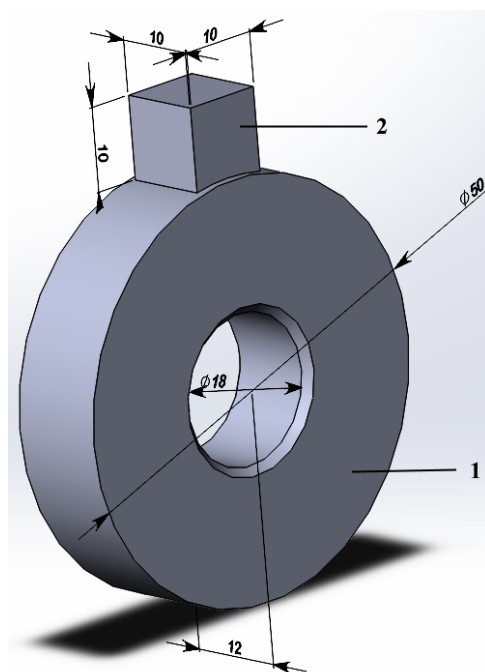
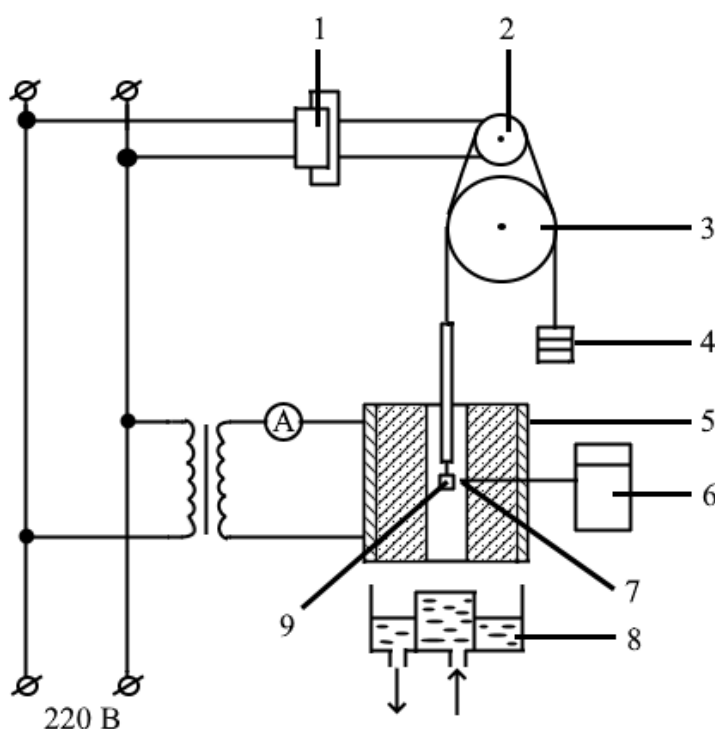


Рисунок 2.7 – Схема контрольного (1) і дослідного (2) зразків при дослідженні зносостійкості чавунів

Випробовувані поверхні зразків знежирювали чотирихлористим вуглецем після чого визначали масу обох контактуючих тіл на демпферних вагах ВЛА–200М. Умови випробування: навантаження – 750 Н, швидкість обертання контрольного зразка – 78 ± 1 см/с, довжина шляху зношування – $2,5 \cdot 10^4$ см. По закінченню випробувань зразки повторно промивали під струменем води і зважували. Зносостійкість чавуну розраховували, як середнє значення зміни маси 5 зразків.

2.12 Випробування термостійкості

Для дослідження термостійкості виготовляли чавунні зразки з розмірами 10x10x15 мм. Термостійкість оцінювали за середньою величиною питомої протяжності тріщин на поверхні шліфа, який при термоциклуванні пройшов 100 теплосмін. Випробування проводили на установці, схематично представленої на рис. 2.8.



1 – реле часу, 2 – електродвигун, 3 – реверсер, 4 – противага,
5 – електрична піч опору, 6 – вимірювальний прилад, 7 – датчик
температури, 8 – водяна ванна; 9 – зразок

Рисунок 2.8 – Схема установки для дослідження термостійкості чавунів [80]

Циклічний нагрів і охолодження зразків проводили за наступним режимом [80]:

- нагрівання від 20 до 650 ± 10 °С;
- ізотермічна витримка протягом 10 хв при 650 ± 10 °С;
- охолодження у воді з температурою 20 ± 2 °С.

2.13 Комп'ютерне моделювання процесу затвердіння та охолодження валків у комбінованій ливарній формі

Комп'ютерне моделювання процесу затвердіння та охолодження валків у комбінованій ливарній формі здійснювали в програмі LVMFlow v2.91 з використанням оцифрованих термограм [53, 81].

2.14 Статистична обробка експериментальних даних

Статистичну обробку експериментальних даних здійснювали за методиками робіт [82...86]. З метою визначення похибки експерименту розраховували кількість повторень експерименту кожного досліджу, за допомогою коефіцієнта варіації та номограми на рис. 2.9 [87].

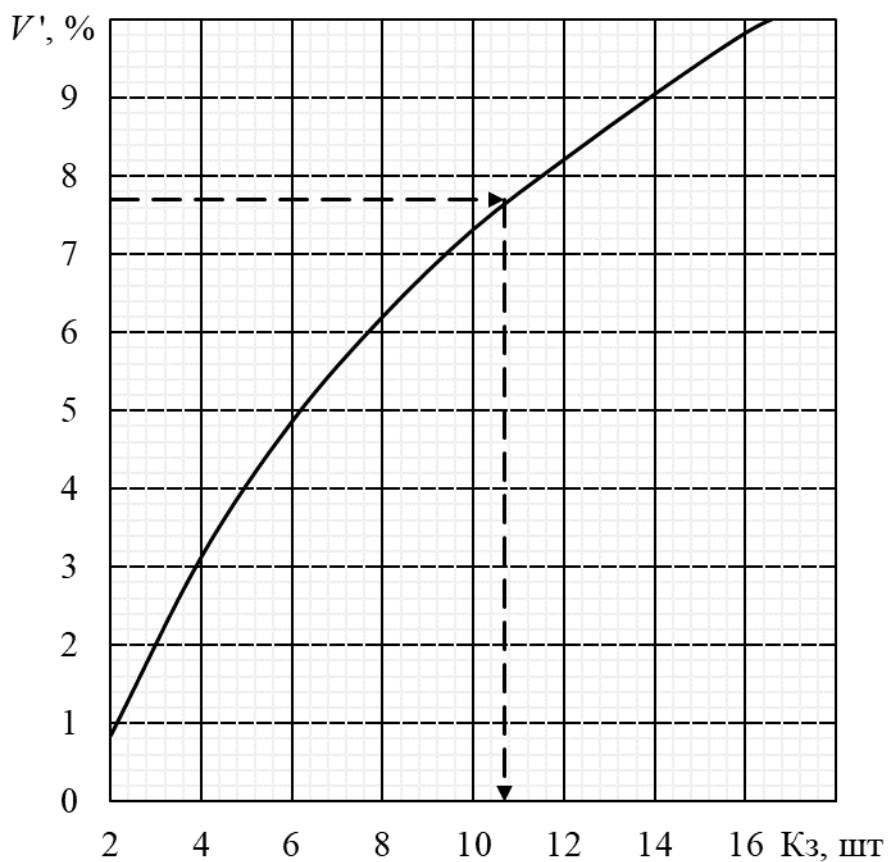


Рисунок 2.9 – Номограма для визначення мінімальної кількості зразків (K_z) в залежності від коефіцієнту варіації при величині довірчої ймовірності 0,95

Коефіцієнт варіації (V' , %) розраховували за формулою:

$$V' = 100 \cdot \sigma \cdot \bar{x}^{-1}, \quad (2.1)$$

де σ – середнє квадратичне відхилення;

$\bar{x}$ – середнє арифметичне значення розподілу величини.

Розрахунок середнього арифметичного значення розподілу величини x проводили за формулою:

$$x = (x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n) \cdot n^{-1}, \quad (2.2)$$

де $x_1, x_2 \dots x_n$ – значення вимірів;

n – число вимірів.

Середнє квадратичне відхилення (σ) величини x розраховували за формулою:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (2.3)$$

2.15 Висновки

1. У роботі використані стандартні методи і апаратура, а також оригінальні і стандартні методики, які дозволили встановити об'єктивний зв'язок між досліджуваними параметрами.

2. Для виконання поставлених у роботі завдань використовували сучасне обладнання для плавки чавунів, проведення хімічного, металографічного, термографічного аналізів та визначення фізико–механічних властивостей.

3. Застосування науково обґрунтованих методів дослідження і обробки експериментальних даних при використанні розроблених методик обробки чавунних розплавів забезпечило отримання результатів з досить високим ступенем точності і достовірності.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МОДИФІКУВАННЯ ТА ЛЕГУВАННЯ ВАЛКОВОГО ЧАВУНУ НА ЙОГО ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ТА СЛУЖБОВІ ВЛАСТИВОСТІ

3.1 Вибілені модифіковані рідкісноземельними металами валкові чавуни

В роботі дослідили структури немодифікованих і модифікованих гадолінієм чавунів у вихідному стані та після переплавлення. Хімічний склад чавуну, прийнятого для досліджень, надано в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Хімічний склад досліджуваного чавуну [88]

Вміст хімічних елементів, % (Fe – решта)					S_C
C	Si	Mn	P	S	
3,49	0,30	0,05	0,005	0,02	0,84

Примітка. S_C – ступінь евтектичності.

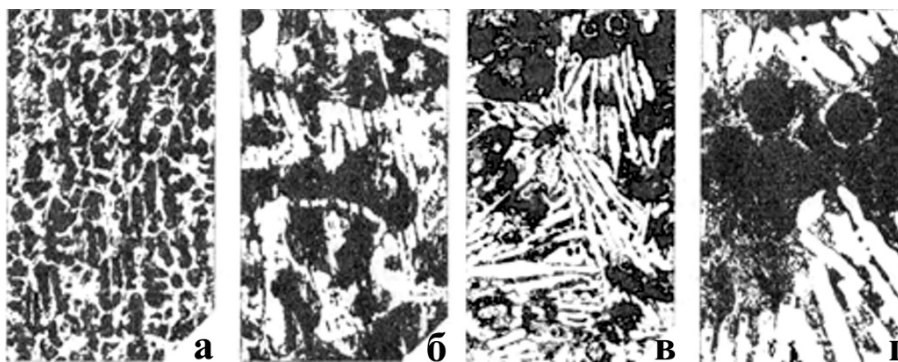
За результатами металографічних досліджень встановлено, що зразок з немодифікованого доевтектичного чавуну (див. табл. 3.1) після кристалізації із швидкістю охолодження 4,5 град/с (яка є у робочому шарі при литті прокатного валка) мав структуру доевтектичного білого чавуну: дендрит аустеніту був оточений ледебуритною евтектикою сотового типу з мікротвердістю 7512 МПа. Евтектоїдне перетворення аустеніту проходило з утворенням троститу, мікротвердість якого була 3883 МПа, рідко зустрічалися ділянки пластинчастого перліту. Перетворення ледебуритного аустеніту частіше проходило з розподілом фаз, цементит нашаровувався на евтектичному, ферит виділявся окремо.

Визначення впливу переплавлення на білі чавуни проводили на зразках від дослідних чавунів на приладі ВДТА-8М. Зразки нагрівали із швидкістю

1,3 град/с до їх плавлення, потім проводили ізотермічну витримку впродовж 10 хв і подальше охолодження зі швидкостями 1,3 і 0,3 град/с.

Після нагріву зразків з немодифікованого чавуну до 1400 °С і охолодження зі швидкостями 1,3 і 0,3 град/с отримували сірі чавуни, структура яких була представлена перліто-феритною матрицею (вид структури металевої основи Пт1+Ф ГОСТ 3443–87) і точковим міждендритним графітом з характеристикою ПГд15-ПГр8 ГОСТ 3443–87. Вміст перліту і фериту в структурі чавуну при охолодженні зі швидкістю 1,3 град/с характеризувався балом П45(ф55), 0,3 град/с – П85(Ф15) ГОСТ 3443–87.

До переплаву структура модифікованого доєвтектичного чавуну з вмістом 1,446% рідкісноземельного металу (гадолінію) відповідала білим чавунам і складалася з 83,3% перліту і 16,7% карбіду, що був продуктом повного розподілу фаз (рис. 3.1, а, б).



а, б – у вихідному стані, в, г – після переплаву і охолодження зі швидкістю 1,3 град / с; а, в – $\times 150$, б, г – $\times 500$; травлено ниталем

Рисунок 3.1 – Мікроструктури чавунів, модифікованих РЗМ, до та після переплаву

Модифікування чавуну вірогідно призвело до зниження температур початку евтектичного і евтектоїдного перетворень і, як наслідок, до

утворення сфероїдизованих графітних включень і виділення пластинчастої ледебуритної евтектики.

Після переплаву зразків з модифікованих чавунів отримували половинчасті чавуни, структури яких були представлені карбідами пластинчастої будови, кулястими включеннями графіту і перлітно-феритною матрицею. При швидкості охолодження 1,3 град/с отримали в структурі чавуну наступну кількість структурних складників: 24% карбідів, 2,3% графіту, 5,2% фериту і 68,5% пластинчастого перліту різного ступеня дисперсності (див. рис. 3.1, в, г). Включення графіту мали кулясту форму з фактором форми 0,9...1,0.

Зменшення швидкості охолодження при кристалізації після переплаву до 0,3 град/с також призводило до такої кількості структурних складників: 14% карбідів, 4,8% графіту, 7,7% фериту і 73,5% перліту різного ступеня дисперсності. Включення графіту також мали кулясту форму з фактором форми 0,9...1,0, а пластини карбідів мали меншу товщину.

За результатами виконаних досліджень встановлено існування спадкового зв'язку між морфологією первинної структури чавунів, модифікованих РЗМ, і структурами переплавлених чавунів.

3.2 Комплексно модифіковані валкові чавуни

Досліджували вплив комплексних модифікаторів СРЗМ30, КМг9 і феротитану ФТи70 на мікроструктуру і властивості валкового чавуну, хімічний склад якого приведений в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Хімічний склад базового чавуну

Тип чавуну	Вміст хімічних елементів, мас.% (Fe – решта)						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
I	3,82	1,06	0,84	0,20	0,03	0,45	2,15

Встановлено, що немодифікований чавун при швидкості охолодження 4,5 град/с мав мікроструктуру половинчастого чавуну з невеликою кількістю графітних включень пластинчастої форми з характеристикою ПГф2–ПГд180–ПГр3–ПГ2 ГОСТ 3443–87 і цементиту ледебуриту Ц40–Цп6000, металева основа виду Пт1 і Ф складалася з перліту дисперсністю ПД0, 5 і 12% фериту (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Мікроструктура і властивості вихідного базового чавуну

Індекс плавки	V, град/с	Кількість структурних складників, %				Властивості чавуну		
		ферит	перліт	цементит	графіт	$\sigma_B^{\text{ВІГ}}$, МПа	$\sigma_B^{\text{Р}}$, МПа	НВ
1	4,5	12,0	53,5	32,0	ПГ2, 5	440	230	410
	0,45	20,0	71,2	–	ПГ9, 8	500	310	190

При охолодженні із швидкістю 0,45 град/с цей же чавун мав мікроструктуру сірого перліто-феритного чавуну з пластинчатим графітом балу ПГф1–ПГд350–ПГр3–ПГ10, матриця виду Пт1 і Ф, П70 (Ф30), перліт дисперсністю ПД1,0 і ПД0,5 ГОСТ 3443–87.

Для встановлення областей утворення в мікроструктурі досліджуваних чавунів графітних включень вермикулярної форми при модифікуванні лігатурою КМг9 присадку лігатури змінювали в межах 0,3...1,2% від маси розплаву (табл. 3.4).

Встановлено, що при швидкості охолодження 4,5 град/с вже залишковий вміст магнію в чавуні 0,019% дозволив змінити форму графітних включень з пластинчастої на вермикулярну. Однак, модифікування лігатурою, що містить магній, при малих концентраціях (0,012%) викликало в мікроструктурі чавуну збільшення кількості графіту, а при подальшому підвищенні вмісту лігатури відбувалося монотонне його зменшення (див. табл. 3.4). Для швидкості охолодження 0,45 град/с область виділення графітних включень вермикулярної форми була обмежена концентраціями магнію 0,022...0,030%.

Таблиця 3.4 – Мікроструктура і властивості чавунів, оброблених лігатурою КМг9

Індекс плавки	Присадка лігатури КМг9, %	Вміст Mg _{зал} , %	V, град/с	Кількість структурних складових, % (за об'ємом)				Властивості чавуну		
				ферит	перліт	цементит	графіт	$\sigma_B^{ВИГ}$, МПа	σ_B^p , МПа	НВ
2	0,3	0,012	4,5	6,1	60,0	30,1	ПГ3,8 (ВГ20)	450	230	417
			0,45	19,8	69,0	–	ПГ11,2	500	315	190
3	0,5	0,019	4,5	5,8	60,0	30,7	ВГ3,5	475	270	420
			0,45	19,0	70,9	–	ПГ10,1 (ВГ25)	530	345	190
4	0,6	0,022	4,5	6,5	60,0	31,2	ВГ2,3	480	290	433
			0,45	16,1	74,0	–	ВГ9,9	780	460	200
5	0,7	0,026	4,5	6,0	60,8	31,0	ВГ2,2 (ШГ50)	475	270	431
			0,45	16,0	74,2	–	ВГ9,8	675	400	198
6	0,9	0,030	4,5	3,5	62,3	32,1	ШГ2,1	540	310	434
			0,45	15,8	74,6	–	ШГ9,6 (ВГ20)	850	485	200
7	1,0	0,037	4,5	3,5	61,8	32,5	ШГ2,2	540	325	440
			0,45	14,5	76,0	–	ШГ9,5	865	485	202

Для визначення інтервалу концентрацій РЗМ, що дозволяють стабільно отримувати графітні включення вермикулярної форми, використовували

лігатуру СРЗМ30. Мікроструктура і властивості чавунів, оброблених лігатурою СРЗМ30, приведені в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Мікроструктурні складники і властивості чавунів, оброблених лігатурою СРЗМ30

Індекс плавки	Присадка СРЗМ30, %	Вміст РЗМ _{зал} , %	V, град/с	Кількість структурних складових, % (за об'ємом)				Властивості чавуну		
				ферит	перліт	цементит	графіт	$\sigma_B^{ВИГ}$, МПа	σ_B^P , МПа	НВ
8	0,1	0,024	4,5	6,1	59,8	31,0	ПГ3,1 (ВГ15)	445	230	419
			0,45	16,1	73,9	–	ПГ10,0	505	300	192
9	0,2	0,045	4,5	4,5	59,8	33,0	ВГ2,7	470	250	425
			0,45	14,0	76,0	–	ПГ10,0	510	305	193
10	0,3	0,066	4,5	2,9	61,8	32,8	ВГ2,5	485	270	421
			0,45	14,6	75,6	–	ПГ9,8 (ВГ20)	510	300	193
11	0,4	0,085	4,5	2,7	62,0	33,1	ВГ2,2 (ШГ20)	495	290	428
			0,45	14,4	75,8	–	ПГ9,8 (ВГ30)	520	350	196
12	0,5	0,104	4,5	2,5	61,3	33,9	ВГ2,3 (ШГ30)	500	300	428
			0,45	15,0	75,2	–	ВГ9,8	690	420	198
13	0,6	0,125	4,5	2,5	61,4	34,1	ШГ2,0	520	320	431
			0,45	14,5	76,5	–	ВГ9,0 (ШГ15)	790	460	197
14	0,7	0,144	4,5	2,0	62,6	34,9	ШГ0,5	525	340	435
			0,45	13,8	78,0	–	ВГ8,2 (ШГ40)	825	465	196
15	0,8	0,165	4,5	1,5	62,9	35,6	–	520	340	439
			0,45	13,2	79,0	–	ШГ7,8	895	500	201

Модифікування досліджуваних чавунів зростаючими кількостями лігатури СРЗМ30 викликало при швидкості охолодження 4,5 град/с зміну

форми графітних включень і збільшення ступеня дисперсності перліту. При концентраціях $P3M_{\text{зал}}$ менше 0,045% форма графітних включень у чавуні залишалася пластинчастою, а вже при присадці 0,2 мас.% лігатури СРЗМ30 в розплав чавуну при $P3M_{\text{зал}} = 0,045\%$ (див. табл. 3.5, плавка 9) близько 80% графітних включень в ньому набували вермикулярної форми ВГф2–ВГр1–ВГ100. Вермикулярна форма графітних включень в досліджуваному чавуні зберігалася до концентрацій $P3M_{\text{зал}} - 0,104\%$ включно (див. табл. 3.5, плавки 10–12). Графіт при вмісті $P3M_{\text{зал}} - 0,085\%$ в чавуні характеризувався балами ВГф2–ВГр1–ВГ92, а при вмісті $P3M_{\text{зал}} - 0,104\%$ – ВГф2–ВГр1–ВГ70. Подальше ж збільшення вмісту $P3M_{\text{зал}}$ в чавуні понад 0,104 до 0,144% забезпечувало отримання в чавуні графітних включень кулястої форми (ШГф4–ШГд45–ШГр1) і повному пригніченню їх виділення при концентрації $P3M_{\text{зал}} - 0,165\%$. Крім того, модифікування валкового чавуну РЗМ привело до значного зниження (на 50...87,5%) кількості фериту (див. табл. 3.5). Модифікування чавунів РЗМ забезпечило зниження кількості фериту на 20...34% і підвищення дисперсності перліту.

Міцнісні властивості чавуну, модифікованого лігатурою СРЗМ30, підвищувалися в середньому на 27% – при отриманні графітних включень вермикулярної форми і на 38...44% – при отриманні графітних включень кулястої форми (див. табл. 3.5). Таким чином, при швидкостях охолодження $V=4,5$ і $V=0,45$ град/с інтервали концентрацій РЗМ, що забезпечували отримання графітних включень вермикулярної форми в досліджуваних чавунах, складали 0,045...0,104 і 0,104...0,144%, відповідно.

Вплив титану (0,04...0,59%) на структуру і властивості чавуну досліджували при вмісті РЗМ, що забезпечувало отримання графітних включень вермикулярної форми ($P3M_{\text{зал}} - 0,040...0,045\%$) (табл. 3.6).

Таблиця 3.6 – Мікроструктурні складники і властивості чавунів, оброблених лігатурою СРЗМ30 і феротитаном ФТн70

Індекс плавки	Присадка, %		Залишковий вміст, %		V, град/с	Кількість структурних складових, % (за об'ємом)				Властивості чавуну		
	СРЗМ30	ФТн70	РЗМ	Ті		ферит	перліт	цементит	графіт	$\sigma_B^{\text{ВІГ}}$, МПа	σ_B^p , МПа	НВ
16	0,2	0,06	0,043	0,04	4,5	4,7	59,3	32,5	ВГ3,5	450	230	418
					0,45	14,6	74,6	–	ПГ10,8 (ВГ25)	500	315	195
17	0,1	0,13	0,014	0,081	4,5	4,7	59,4	32,6	ВГ3,3	450	240	418
					0,45	14,4	75,2	–	ПГ10,4 (ВГ35)	500	320	200
18	0,2	0,4	0,044	0,24	4,5	2,4	62,7	33,4	ВГ1,5	480	250	437
					0,45	14,0	76,2	–	ПГ9,8 (ВГ50)	510	330	204
19	0,2	0,6	0,045	0,41	4,5	2,5	62,6	33,6	ВГ1,3	490	265	432
					0,45	14,1	76,2	–	ПГ9,7 (ВГ50)	510	330	218
20	0,2	0,9	0,040	0,59	4,5	2,2	60,7	33,9	ВГ3,2	490	260	432
					0,45	13,6	77,4	–	ПГ9,0 (ВГ50)	515	325	217
21	0,3	0,6	0,065	0,42	4,5	2,7	61,9	33,0	ВГ2,4	495	285	427
					0,45	13,8	76,6	–	ПГ9,6 (ВГ50)	530	340	215
22	0,4	0,6	0,084	0,40	4,5	2,2	62,3	33,4	ВГ2,1	505	310	431
					0,45	13,8	77,0	–	ВГ9,2	670	400	215
23	0,5	0,6	0,103	0,40	4,5	2,0	62,4	33,6	ВГ2,0 (ШГ40)	530	330	431
					0,45	13,4	77,3	–	ВГ9,3	695	460	217
24	0,7	0,5	0,156	0,41	4,5	1,5	65,0	33,0	ШГ0,5	535	340	435
					0,45	12,3	80,0	–	ВГ7,7	715	470	220

Встановлено, що вже мінімальні кількості титану у складі чавуну (0,04%) дозволяли отримувати весь графіт у вермикулярній формі при швидкості охолодження 4,5 град/с, а при швидкості охолодження 0,45 град/с тільки 25% графітних включень мали вермикулярну форму (див. табл. 3.6). Збільшення вмісту титану в чавуні до 0,59% призводило до збільшення до 50% кількості вермикулярного графіту в чавунах, що тверділи із швидкістю 0,45 град/с.

Міцнісні властивості модифікованих РЗМ чавунів, що містили 0,04...0,08% Ti (див. табл. 3.6, плавки 16 і 17) і що тверднули при швидкості охолодження 4,5 град/с, практично залишалися на рівні вихідних і знижувалися на 4...9% в порівнянні з модифікованими, що не містять титан. При подальшому збільшенні вмісту титану до 0,41% міцнісні властивості чавунів зростали в середньому на 5% в порівнянні з модифікованими і на 9...15% в порівнянні з вихідними чавунами (див. табл. 3.6, плавки 20 і 21). Збільшення вмісту титану до 0,59% практично не вплинуло на міцнісні властивості досліджених модифікованих чавунів. Вплив же титану в дослідженому інтервалі концентрацій на міцнісні властивості чавунів, що тверділи із швидкістю 0,45 град/с, було незначним. Таким чином, враховуючи вищевикладене, раціональним вмістом титану в модифікованих РЗМ чавунах слід вважати його концентрацію 0,3...0,5%.

Для встановлення області утворення графітних включень вермикулярної форми при обробці зростаючими кількостями лігатури СРЗМ30 при постійному вмісті титану 0,040...0,042% провели 4 плавки (див. табл. 3.6, плавки 21...24). Встановлено, що при вмісті титану 0,40...0,42% і швидкості охолодження 4,5 град/с вже при концентраціях $RZM_{зал}$ – 0,065...0,084% в чавуні утворилися графітні включення вермикулярної форми. Область виділення графітних включень вермикулярної форми розширювалася до концентрації $RZM_{зал}$ – 0,156%, потім слідувала область утворення графітних включень кулястої форми, а при концентрації $RZM_{зал}$ –

0,20% виділення графіту повністю пригнічувалося. Розширення області виділення графітних включень вермикулярної форми при обробці чавуну лігатурою СРЗМ30 і феротитаном проходило і при швидкості охолодження 0,45 град/с. Область утворення вермикулярного графіту розширювалася з інтервалу концентрацій РЗМ_{зал} від 0,104...0,144 до 0,084...0,156%.

Характер зміни міцнісних властивостей чавунів, оброблених феротитаном і лігатурою СРЗМ30, при різних швидкостях охолодження був приблизно однаковий [89].

Таким чином, найбільш раціональним залишковими вмістами РЗМ і титану в досліджуваних чавунах слід вважати 0,082...0,085 і 0,40...0,41%, відповідно, за яких при досліджених швидкостях 4,5 і 0,45 град/с в мікроструктурі чавунів отримували тільки вермикулярний графіт. Властивості чавунів з оптимальним залишковими вмістами РЗМ і титану в порівнянні з вихідними чавунами були вищими: $\sigma_{\text{в}}^{\text{виг}}$ на 15 і 38%, $\sigma_{\text{в}}^{\text{р}}$ – на 35 і 29%, твердість – на 5 і 13%, відповідно при швидкостях охолодження 4,5 і 0,45 град/с.

3.3 Вплив суміші для модифікування та легування валкових чавунів на їх міцність та термостійкість

З метою застосування відходів різних спеціальних виробництв та збільшення термостійкості валкових чавунів досліджено вплив механічної суміші з таких компонентів, мас.‰: шлак алюмотермічного виробництва лігатур на основі РЗМ – 73...77; відходи виробництва надпровідників – 10...20; карбід лантану – 7...13 [90].

При розробці складу суміші для модифікування та легування чавунів виходили з наступного. Для досягнення поставленої мети необхідно одержати ферито–перлітну структуру з рівномірно розподіленими дрібнодисперсними включеннями графіту кулястої форми.

Співвідношення фериту і перліту у структурі та одержання дрібнодисперсних графітних включень кулястої форми досягалося, з одного боку, модифікуванням рідкісноземельним шлаком та карбідом лантану (феритизуючий та диспергуючий вплив), а з іншого – легуванням міддю (перлітизуючий вплив) та підвищенням ступеня дисперсності продуктів розпаду аустеніту за рахунок легування титаном та ніобієм.

Для одержання необхідного високого рівня міцнісних властивостей необхідно ввести у розплав компоненти шлаку, мас.‰: R_2O_3 0,15...0,35; SiO_2 0,11...0,45; CaO 1,5...2,2; Al_2O_3 1,5...2,2; компоненти відходів надпровідників, мас.‰: 0,2...0,4% міді, 0,15–0,30% Ti та 0,15...0,30% ніобію, а також карбіду лантану 0,3...0,7% .

При введенні R_2O_3 та SiO_2 менше 0,15 та 0,11% відповідно, досягти необхідного ступеня дисперсності графітних включень неможливо, а збільшення присадок більше вказаної кількості сприяє виділенню великої кількості неметалевих включень, що зменшує механічні властивості. Для одержання в литому стані ферито–перлітної структури зі співвідношенням фаз 1:1 визначають величини присадок CaO , Al_2O_3 та міді. При присадках CaO , Al_2O_3 та міді більше та менше вказаних меж порушується співвідношення структурних фаз і відповідно зменшуються або пластичні або міцнісні характеристики чавуну та мета не досягається. Рівні вмісту легувальних елементів (Ti та Nb) повинні бути 0,15...0,30%. За таких вмістів цих елементів досягаються максимальні міцності властивості.

Встановлений раціональний вміст карбіду лантану у суміші (0,3...0,7%), за якого одержуються максимальні рівні термостійкості та міцнісних характеристик чавуну. При вмісті більше вказаних меж матриця погрублюється та зменшуються властивості. Вміст карбіду лантану нижче за 0,3% не забезпечують одержання графітних включень дрібної кулястої форми та досягнення необхідного рівня термостійкості та міцнісних властивостей.

У промислових умовах одержали необхідні компоненти нової модифікуючої суміші – рідкісноземельний шлак або відходи виробництва рідкісноземельних лігатур, карбід лантану та легувальний комплекс – відходи виробництва надпровідників.

У високочастотній індукційній печі виплавили валковий чавун складу, мас. %: С 3,32, Si 0,80, Mn 0,54, P 0,06, S 0,02, Fe решта. Після досягнення температури 1450 ± 5 °С та витримки протягом 5 хв розплав чавуну випускали порціями у розігрітий розливальний ківш із заздалегідь завантаженими на дно сумішами. Усі суміші присаджувалися у кількості 5,0 мас. %. Після зняття шлаку та досягнення температури 1320 ± 5 °С чавун розливали по кокільних формах для одержання виливків циліндричної форми. З одержаних виливків вирізали зразки для металографічного аналізу, визначення термостійкості та границі тимчасового опору при розтягуванні. Одержані результати випробувань наведені у таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Результати експериментальних досліджень

Номер чавуну	Кількість компонентів у суміші, %			Кількість структурних складових у чавуні, % (за об'ємом)			Розподіл включень графіту	Властивості матеріалу виливків		
	Шлак алюмотермічного виробництва лігатур на основі рідкісноземельних металів	Відходи виробництва надпровідників	Карбід лантану	графіт	ферит	перліт		σ_b^p , МПа	Термостійкість, см	Розрахункові залишкові фазові напруження за формулою (1.2)
1	73	20	7	8,0	45,0	47,0	ШГр4	800	0,11	-110
2	75	15	10	9,5	46,0	44,5	ШГр4	815	0,10	-111
3	77	10	13	10,0	45,0	45,0	ШГр4	820	0,09	-110
4	71	25	4	8,5	38,5	53,0	ВГр5	750	0,13	-105
5	79	5	16	11,5	55,5	31,0	ШГр3	775	0,12	-118
6	80	20	–	10,0	44,0	46,0	ПГр8	785	0,14	-110
7	90	10	–	12,0	44,0	44,0	ПГр8	770	0,15	-110

Встановлено, що застосування запропонованої суміші для модифікування та легування дозволило досягти поставленої мети: при високому рівні міцності $\sigma_b^p = 750 \dots 820$ МПа термостійкість чавуну збільшилися на 24...38% при практично незмінній величині залишкових фазових напружень. Тобто підвищення міцності чавуну дозволило збільшити його термостійкість, та відповідно, довговічність.

3.4 Вплив комплексного модифікатора, що містить РЗМ, титан і гафній, на міцність та зносостійкість валкових чавунів

В основу досліджень була поставлена задача одержання лігатури для білих чавунів з підвищеними характеристиками міцності та зносостійкості, яку потребує сучасне виробництво.

З метою підвищення міцності та зносостійкості вибілених чавунів проводили їх модифікування лігатурою, до складу якої входили, мас. %: РЗМ – 35...45; С – 0,5...0,8; Si – 20...25; Ti – 20...25; Ca – 0,5...2,0; Al – 0,5...2,0; Hf – 3...6; Fe – решта [91]. Крім РЗМ досліджено вплив титану та гафнію на зносостійкість білих валкових чавунів.

Встановлено, що при вмісті Ti < 0,2% у структурі чавуну виділяється незначна кількість спеціальних високо твердих карбідів та вплив їх на зносостійкість не помітний. При збільшенні вмісту Ti вище 0,3% відбувається погрублення структури, і, як слідство, зменшення міцності чавуну. Таким чином, виходячи з передумов, які наведені вище (засвоєння та величина присадки лігатури), границі концентрацій Ti у лігатурі складають 20...25%.

При вмісті Hf < 0,04% у структурі чавуну підвищується дисперсність структурних складових, але вплив цих змін на міцність незначний. При збільшенні вмісту Hf > 0,08% відбувається погрублення структури, що призводить до зменшення міцності та зносостійкості. Таким чином, виходячи

з передумов, які наведені вище (засвоєння та величина присадки лігатури), границі концентрації Hf у лігатурі складають 3...6%.

Нижня границя Si визначена з урахуванням можливостей алюмосилікотермічного та карботермічного способів одержання лігатури. При вмісті кремнію у лігатурі більше 25% одержати білий чавун без графітних включень, які зменшують його зносостійкість, утруднено, тому верхня границя вмісту кремнію обмежена 25%.

Границі вмісту C, Ca та Al пов'язані з технологічними особливостями виробництва лігатур алюмосилікотермічним, карботермічним та кальцієтермічним способами. Крім того, верхня границя вмісту Ca обумовлена впливом його на в'язкість шлаку: при вмісті Ca > 2,0% в'язкість шлаку не припустимо для процесу виплавки зростає.

Для подальших досліджень використовували наступні лігатури, склади яких наведені у таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Хімічний склад дослідних лігатур

Номер лігатури	Вміст хімічних елементів,% (Fe – решта)						
	ΣРЗМ	C	Si	Ti	Hf	Ca	Al
1	35,2	0,8	20,0	20,1	3,1	0,7	0,5
2	40,3	0,6	22,1	22,0	4,5	1,1	0,75
3	43,9	0,5	23,1	24,1	5,7	1,0	0,5

Для модифікування та легування у високочастотній індукційній печі виплавили валковий чавун складу, мас. %: C – 3,32, Si – 0,80, Mn – 0,54, P – 0,06, S – 0,02, Fe решта. Після досягнення температури 1450 ± 5 °C та витримки протягом 5 хв випускали порціями у розігрітий розливальний ківш з заздалегідь завантаженою на дно лігатурою. Усі лігатури присаджувалися у кількості 1,0%. Після зняття шлаку та досягнення температури 1320 ± 5 °C

заливали чавуном кокілі для виливків діаметром 50 мм та висотою 200 мм. Результати випробувань наведені у табл. 3.9.

Таблиця 3.9 – Основні результати досліджень

Номер чавуну та ліга- тури	Хімічний склад чавуну, %				Межа тимчасового опору при вигині σ , МПа	Зносостійкість И, г
	$\Sigma P3M$	Si	Ti	Hf	$\bar{\sigma}$	$\bar{И}$
1	0,205	0,98	0,19	0,04	673	0,031
2	0,22	0,99	0,20	0,06	715	0,032
3	0,27	1,00	0,21	0,08	715	0,025

Результати проведених досліджень показали, що модифікування білих чавунів лігатурою нового складу (див. табл. 3.9) позитивно впливало на їх зносостійкість. При цьому між межею тимчасового опору при вигині і зносостійкістю робочого шару чавуну існувала пропорційна залежність, що свідчить про відсутність будь якого зв'язку між зносостійкістю і залишковими напруженнями в робочому шарі.

3.5 Вплив структурних складових на залишкові фазові напруження в досліджуваних чавунах

За результатами проведених досліджень за формулою (1.2) розраховували залишкові фазові напруження для вибіленого та сірого чавунів прийнявши: $t_{III1} = 620\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_{HC} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$; $E_1 = 160000\text{ МПа}$; ϕ – див. табл. 3.10; для фериту – $k_{\phi} = 12,5 \cdot 10^{-6}\text{ град}^{-1}$, цементиту – $k_{\phi} = 9,1 \cdot 10^{-6}\text{ град}^{-1}$ [92, 93], перліту – $k_1 = 11 \cdot 10^{-6}\text{ град}^{-1}$, результати яких надано в табл. 3.10.

Продовження табл. 3.10

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
13	–	–	0,6	0,125	–	–	4,5	2,5	61,4	34,1	520	320	431	61	85
							0,45	14,5	76,5	–	790	460	197	39	-76
14	–	–	0,7	0,144	–	–	4,5	2,0	62,6	34,9	525	340	435	62	89
							0,45	13,8	78,0	–	825	465	196	39	-74
15	–	–	0,8	0,165	–	–	4,5	1,5	62,9	35,6	520	340	439	62	94
							0,45	13,2	79,0	–	895	500	201	39	-73
16	–	–	–	–	0,2	0,06	4,5	4,7	59,3	32,5	450	230	418	59	73
							0,45	14,6	74,6	–	500	315	195	39	-76
17	–	–	–	–	0,1	0,13	4,5	4,7	59,4	32,6	450	240	418	59	74
							0,45	14,4	75,2	–	500	320	200	39	-75
18	–	–	–	–	0,2	0,4	4,5	2,4	62,7	33,4	480	250	437	62	85
							0,45	14,0	76,2	–	510	330	204	39	-75
19	–	–	–	–	0,2	0,6	4,5	2,5	62,6	33,6	490	265	432	61	85
							0,45	14,1	76,2	–	510	330	218	40	-75
20	–	–	–	–	0,2	0,9	4,5	2,2	60,7	33,9	490	260	432	61	87
							0,45	13,6	77,4	–	515	325	217	40	-74
21	–	–	–	–	0,3	0,6	4,5	2,7	61,9	33,0	495	285	427	61	83
							0,45	13,8	76,6	–	530	340	215	40	-74
22	–	–	–	–	0,4	0,6	4,5	2,2	62,3	33,4	505	310	431	61	86
							0,45	13,8	77,0	–	670	400	215	40	-74
23	–	–	–	–	0,5	0,6	4,5	2,0	62,4	33,6	530	330	431	61	88
							0,45	13,4	77,3	–	695	460	217	40	-74
24	–	–	–	–	0,7	0,5	4,5	1,5	65,0	33,0	535	340	435	62	91
							0,45	12,3	80,0	–	715	470	220	40	-72

Залежність фазових напружень у чавуні від його твердості та залежність зміни коерцитивної сили від зміни твердості чавуну представлено на рис. 3.2 та 3.3.

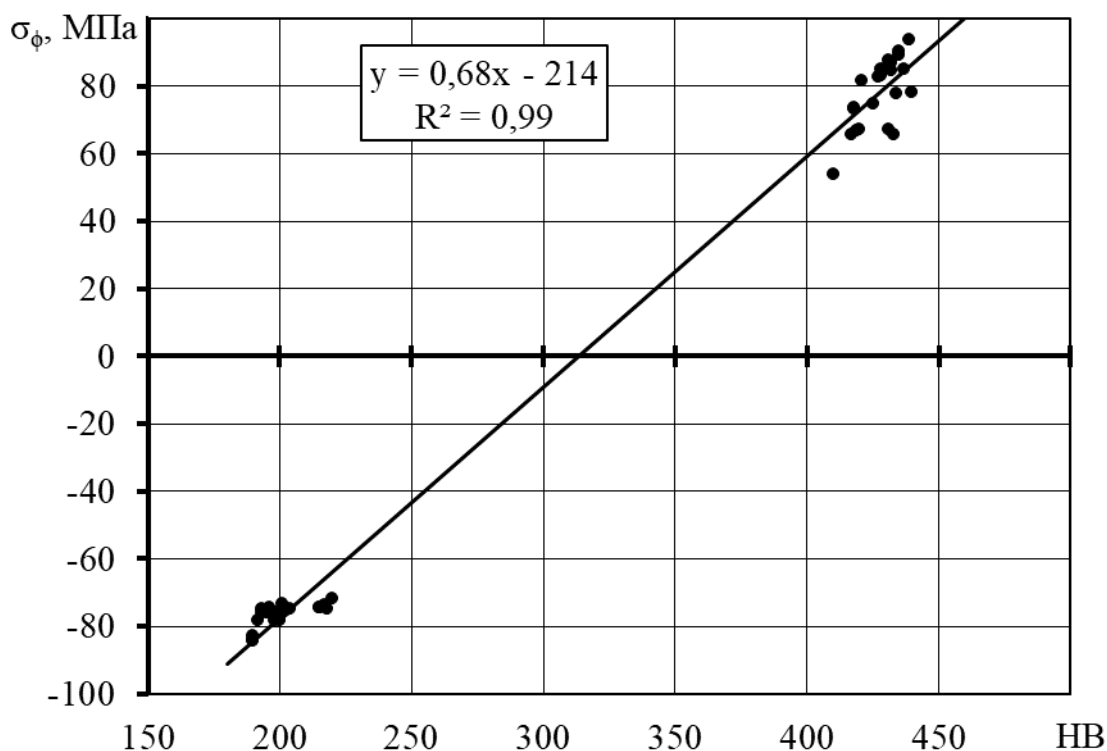


Рисунок 3.2 – Залежність фазових напружень у чавуні від його твердості

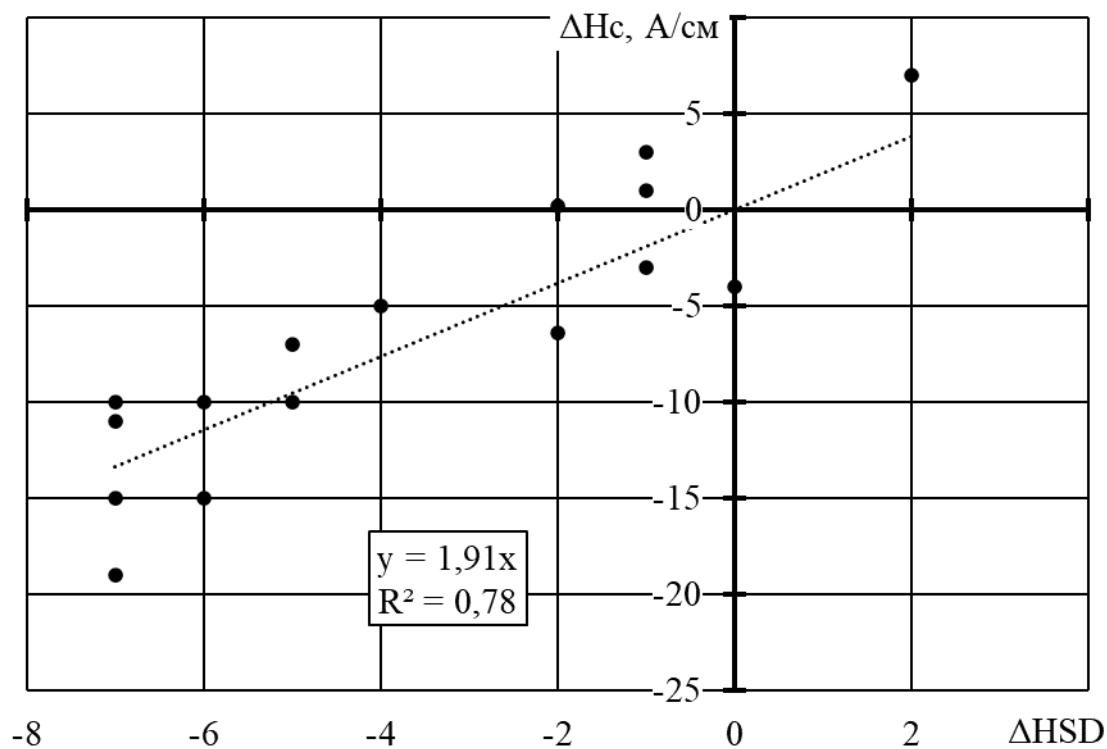


Рисунок 3.3 – Залежність зміни коерцитивної сили від зміни твердості чавуну

З аналізу залежностей (див. рис. 3.2, 3.3) видно, що величина залишкових напружень залежить від величини твердості чавуну, яка, в свою чергу, визначається кількістю фазових складових і величиною коефіцієнтів їх термічного лінійного розширення.

3.6 Вплив сумішей з комплексного модифікатору та компонентів, що містять гадоліній, на величину залишкових фазових напружень у чавуні після відпалювання

В лабораторних умовах було досліджено два типи сумішей з модифікаторів на рівень залишкових напружень після релаксаційного відпалу чавунів прокатних валків.

Зазначену задачу вирішували позапічним модифікуванням механічною сумішшю з комплексного модифікатора на основі РЗМ та оксиду гадолінію у співвідношенні 12:1 [94] або механічною сумішшю з комплексного модифікатора на основі РЗМ та гадолінієвого концентрату у співвідношенні 10:1 [95].

Випробовування здатності до зняття напружень при релаксаційному відпалі проводили за допомогою спеціального пристрою на трьох зразках—балках рівного опору. Релаксаційний відпал проводили за таким режимом: нагрівання зі швидкістю 25 град/год до 550 ± 5 °С, витримка 1 год, охолодження зі швидкістю 25 град/год до 20 °С. Вимір деформацій до та після відпалу проводили за допомогою індикатора часового типу з ціною поділки 0,01 мм.

В роботі показано (табл.3.11) [96], що використання нових сумішей при витраті суміші у кількості 0,54...0,76% від маси металу, дозволило зменшити залишкові напруження у чавунах на 55,7...75,9% після проведення його відпалу при практичній незмінності його первинної структури.

Таблиця 3.11 – Результати випробовування прокатних валків

Витрата модифікаторів, % за масою				Вміст хімічних елементів у чавуні, % (Fe – решта)							Відносне зменшення напружень після відпалу, %	Типи графіту та перліту чавунів після відпалу	
CP3M30	Gd ₂ O ₃	K _{Gd} *	FC75	C	Si**	Mn	P	S**	Cr	Ni	P3M	Графіт	Перліт
0,5	0,04	–	0,2	3,53	$\frac{1,24}{1,49}$	0,55	0,18	$\frac{0,03}{0,01}$	0,61	1,8	0,13	ВГр1, ВГр3	ПД1,0; ПД0,5
0,7	0,06	–	0,4	3,52	$\frac{1,28}{1,50}$	0,58	0,16	$\frac{0,03}{0,008}$	0,95	1,2	0,16	ВГр1, ВГр3	ПД1,0; ПД0,5
0,5	–	0,05	0,2	3,50	$\frac{1,24}{1,49}$	0,56	0,18	$\frac{0,03}{0,01}$	0,83	1,6	0,11	ВГр1, ВГр3	ПД1,0; ПД0,5
0,7	–	0,07	0,4	3,52	$\frac{1,28}{1,50}$	0,58	0,16	$\frac{0,03}{0,01}$	0,97	1,4	0,13	ВГр1, ВГр3	ПД1,0; ПД0,5

Примітки. *Гадолінієвий концентрат – K_{Gd} (85% Gd₂O₃, 2...3% Dy₂O₃ 2...3, оксиди тербію, ербію, самарію – решта).

** У знаменнику - вміст елемента у робочому парі валка після модифікування, у чисельнику – до модифікування

3.7 Висновки

1. Модифікування і легування валкових чавунів досить ефективні способи зменшення залишкових напружень в термічно оброблюваних чавунних валках.

2. Незалежно від способу модифікування і матеріалу модифікатора литі чавунні валки необхідно термічно обробляти для зменшення в них рівня залишкових напружень.

3. Модифікування валкового чавуну не дозволяє використовувати прокатні валки у виробництві прокату без проведення певної релаксаційної термічної обробки.

Матеріали розділу опубліковано у [88, 89, 90, 91, 94, 95, 96, 97].

РОЗДІЛ 4

ТЕРМОЧАСОВІ РЕЖИМИ РЕГУЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ТВЕРДІННЯ ТА ОХОЛОДЖЕННЯ ЧАВУННИХ ПРОКАТНИХ ВАЛКІВ ЗІ ЗМЕНШЕНИМ РІВНЕМ ЗАЛИШКОВИХ ЛИВАРНИХ НАПРУЖЕНЬ

4.1 Обґрунтування часу реалізації процесу гарячого посаду

Чавунні прокатні валки мають у бочці робочий шар білого чавуну з кількістю цементиту і ледебуриту 30...35% у мікроструктурі, перехідну зону із половинчастого чавуну та центральну (осьову) зону із сірого чавуну [81, 98]. Вільна і утруднена усадки цих частин валка різні: у білого чавуну 1,6...2,3% і 1,5...1,8%, чавуну з пластинчастою формою графіту складає 0,9...1,3% і 0,8...1,0% [53].

Також відрізняються значення теплофізичних коефіцієнтів густини, теплопровідності, теплоємності, термічного розширення, фазових перетворень при охолодженні білого чавуну робочого шару бочки (1 на рис. 4.1), половинчастого (2 на рис. 4.1) і сірого чавунів (3 на рис. 4.1).

Ці фактори обумовлюють виникнення ливарних напружень у литих прокатних валках. Для зменшення залишкових напружень виливки повинні проходити природне старіння (вилежування) або термічну обробку (відпал), або піддаватися впливу на них вібрацією певної частоти і амплітуди [53].

На даному етапі досліджень основною метою було зменшення рівня залишкових напружень за рахунок регулювання процесу охолодження чавунних прокатних валків в ливарній формі, яке забезпечить зменшення перепаду температури по радіусу бочки валка. Таке припущення витікає з того, що:

- основними параметрами валків є глибина та твердість робочого шару бочки на контрольній глибині [100];

– зменшення перепаду температури по перерізу бочки пропонуємо реалізувати за рахунок теплоізоляції ливарної форми від навколишнього середовища;

– робочий шар валка швидко охолоджується у кокілі і твердіє в першу чергу, а осьова зона бочки ще знаходиться в інтервалі температур ліквідус-солідус [53]. Тому, теплоізоляція зовнішньої поверхні ливарної форми від навколишнього середовища забезпечить уповільнення швидкості охолодження робочого шару і зменшення перепаду температури з центральною частиною бочки;

– робочий шар бочки валка утворюється завдяки високій швидкості охолодження в кокілі [98] заданого хімічного складу чавуну [100]. Первинний цементит (Fe_3C) і ледебурит утворюються в інтервалі температур кристалізації. Нижче температури евтектичного перетворення 1147°C розчинність вуглецю в аустеніті зменшується з $\approx 2,06\%$ до $\approx 0,8\%$, відбувається виділення вторинного цементиту, 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, зменшується можливість утворення фериту і сприяє формуванню перліту. Це також підвищує твердість і експлуатаційну стійкість прокатних валків [98, 99]. Нижче температури евтектоїдного перетворення 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, виходячи з викладеного вище, прийняли припущення, що під час затвердіння і охолодження валка зменшення теплопередачі в

навколишнє середовище від кокілю необхідно здійснювати в момент закінчення евтектоїдного перетворення у чавуні робочого шару [101].

4.2 Дослідження впливу теплової ізоляції кокілю від зовнішнього середовища на затвердіння і охолодження чавунного прокатного валка

4.2.1 Вихідні передумови реалізації технології екранування ливарної форми

Згідно діючим технічним умовам [100] великий діапазон розмірів прокатних валків і їх маси від десятків кілограмів до 50 т обумовлює необхідність визначати час початку теплоізоляції ливарної форми від навколишнього середовища за результатами комп'ютерного моделювання.

Основним вимогам виконання поставленої мети відповідає програма LVMFlow, яка використовує метод кінцевих елементів і дозволяє корегувати теплофізичні коефіцієнти у широкому діапазоні. Однак реалізація програми можлива лише за умови визначення теплофізичних коефіцієнтів, що впливають на процес твердіння і охолодження чавунних прокатних валків в комбінованих кокільно-піщаних ливарних формах. Ці коефіцієнти залежать від температури і відомі лише орієнтовно, а в момент проходження фазових перетворень їх розрахунок ще більше ускладнюється. Тому для адаптування програми LVMFlow к умовам серійного виробництва валків різних типорозмірів спочатку проводили термографування твердіння і охолодження еталонних прокатних валків після чого вносили зміни в величини теплофізичних властивостей чавуну і елементів комбінованої кокільно-піщаної ливарної форми. Програму вважали адаптованою якщо відносне розходження між розрахованими за програмою і експериментально встановленими величинами температур не перевищувало 10%.

4.2.2 Обґрунтування температурних режимів роботи матеріалу теплоізоляції і розробка конструкції пристрою для виконання гарячого посаду

Результати експериментальних досліджень процесу нагріву і охолодження кокілю в умовах діючого виробництва наведено у роботах [53, 104] за якими температура внутрішнього поверхневого шару кокілю досягає 450 °С в перші 2...3 хв після закінчення заливання валка і її підвищення припиняється через утворення усадкового зазору між бочкою і кокілем [53]. Усадковий зазор збільшується на протязі твердіння і охолодження бочки, але урахувати конкретні значення усадки можливо лише приблизно.

Для проведення реального та комп'ютерного експерименту у якості матеріалу екрану використовували склотканину теплоізоляційну полотняного переплетення білого кольору марки «Т-13» з ниток алюмоборосілікатного скла, які не горючі, хімічно стійкі [105].

У дослідженнях двошаровий теплоізоляційний екран виконували шляхом закріплення склотканини виконували на сталевому каркасі з сортового прокату Ø10 мм і П-образними виступами для теплоізоляції цапф кокілю, що надано на рис. 4.1. Розміщення теплоізоляційного пристрою на верхньому торці ливарної форми забезпечили 10 сталевих стрижнів виступаючої опори.

На каркасі перший шар теплоізоляційної тканини розміщували на відстані 30 мм від зовнішньої поверхні кокілю, що надано на рис. 4.2,а, другий шар – на відстані 60 мм (див. рис. 4.2,б). Додатковий горизонтальний повітряний теплоізоляційний зазор верхньої частини пристрою забезпечили за рахунок розміщення зовнішнього сталевих каркасу на 30 мм вище внутрішнього і монтажу двох шарів склотканини. На верхній частині сталевих каркасу приварювали Г-образні зачепи для виконання кранових операцій, збирання та розбирання форми, що надано на рис. 4.3.

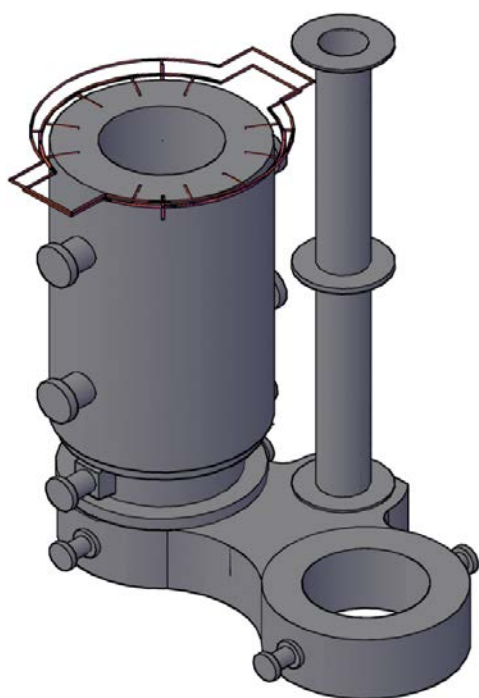
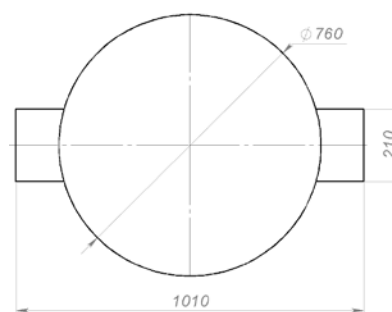
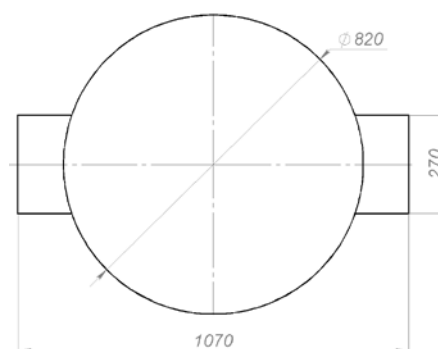


Рисунок 4.1 – Схема розміщення сталевго каркасу на кокілі



а



б

Рисунок 4.2 – Внутрішній (а) і зовнішній (б) сталеві каркаси



Рисунок 4.3 – Загальний вид пристрою для теплоізоляції ливарної форми, що розташований на двомісному піддоні при виконанні дослідження температури твердіння та охолодження експериментального та серійного валків

4.2.3 Технологічні особливості проведення дослідження впливу теплоізоляції ливарної форми на температуру твердіння та охолодження теплоізованого та серійного валків

Ливарні форми експериментального і серійного валків встановлювали на двомісному піддоні, що забезпечило єдину сифонну литникову систему з тангенціальним підведенням живильників до нижніх шийок. Гарячі спаї ХА-термопар розміщували на відстані 20 і 60 мм від поверхні кокілю, що відповідає мінімальній і максимальній товщині робочого шару бочки.

Плавку чавуну проводили в індукційній печі ІЧТ-6 відповідно до діючої технології [106]. Хімічний склад чавуну досліджуваних валків перед випуском з печі складав, мас. %: С 3,59, Si 0,61, Mn 0,53; P 0,051, S 0,024, Cr 0,64, Ni 1,65, Mo 0,024, Cu 0,12.

Коригування товщини робочого шару бочки виконували пропорційно до глибини вибіленого шару на технологічній пробі, креслення якої наведено у розділі 2. Після розплавлення шихти і другого коригування розплаву глибина вибілу дорівнювала 45 мм, яку встановлювали на пробі за допомогою лінійки вимірюючи відстань від торця проби до місця зламу, на якому з'являлися три чорні точки на дузі 10 мм, що надано на рис. 4.4.



Рисунок 4.4 – Злам макроструктури технологічної проби і глибина вибілу 45 мм для валків виконання СПХН-60 з діаметром бочки 390 мм

Після формовки, сушки і складання елементів комбінованих ливарних форм в кесоні, здійснювали установку і закріплення термопар в кокілі серійного і експериментального валків за допомогою формувальних шпильок (рис. 4.5).



Рисунок 4.5 – Загальний вигляд ливарної форми у кесоні і термопар, які фіксували формувальними шпильками на заданій глибині у порожнині бочки

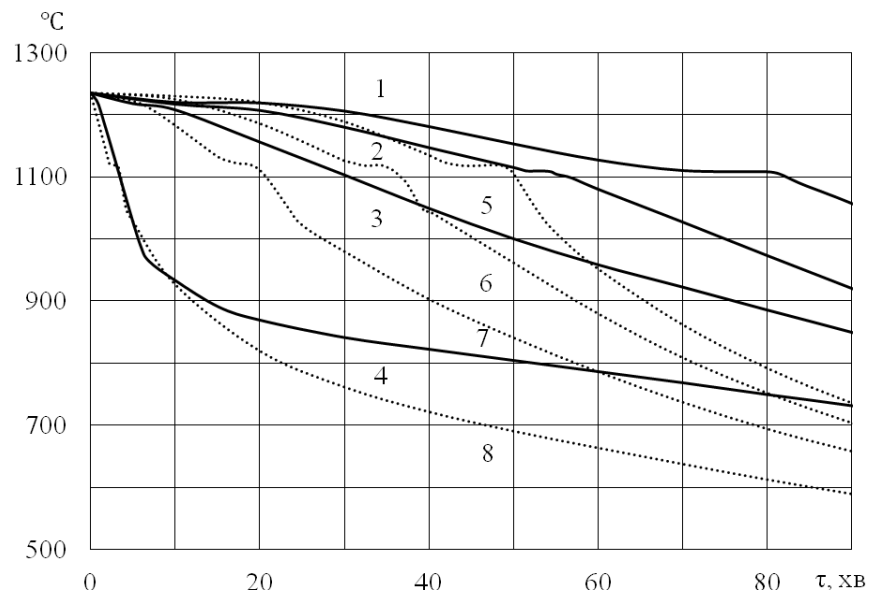
Температура заливання чавуну теплоізовованого і серійного валків складала 1320 ± 5 °С. Після закінчення заливки дзеркало металу надливів утеплювали шаром екзотермічної суміші, а на 12-ій хвилині доливали розплавом з температурою 1410 °С, який готували у окремій печі.

Заливка розплаву валків через загальний стояк з тангенціальним підведенням живильників в нижні шийки валків забезпечила достовірність результатів вимірів температур кристалізації і охолодження робочого шару бочки. Але для реалізації поставленої мети необхідно встановити тривалість проходження процесу евтектоїдного охолодження робочого шару чавунних прокатних валків різних діаметрів, що можливо виконати тільки при моделюванні охолодження за допомогою математичної моделі LVMFlow.

4.2.4 Адаптація моделі LVMFlow до процесу затвердіння чавунного прокатного валка в комбінованій кокільно-піщаній ливарній формі

Точність результатів розрахунку багато в чому залежить від адаптації моделі до реальних процесів затвердіння сплаву, отриманих найчастіше за допомогою експериментальних термографічних досліджень [53].

Точність розрахунку моделі оцінювали у порівнянні з експериментальними дослідженнями процесів затвердіння за допомогою термопар на прокатному валку масою 2200 кг з чавуну мас. %: С 3,10; Si 1,41; Mn 0,58; P 0,214; S 0,010; Cr 0,34; Ni 0,91; Mg 0,03. Аналіз експериментальних кривих охолодження №№ 1, 2, 3, 4 (рис. 4.6) [107] бочки валка Ø450 мм показав значне зменшення температури в процесі заливання з 1320 °С до 1230 °С через 3 хв.

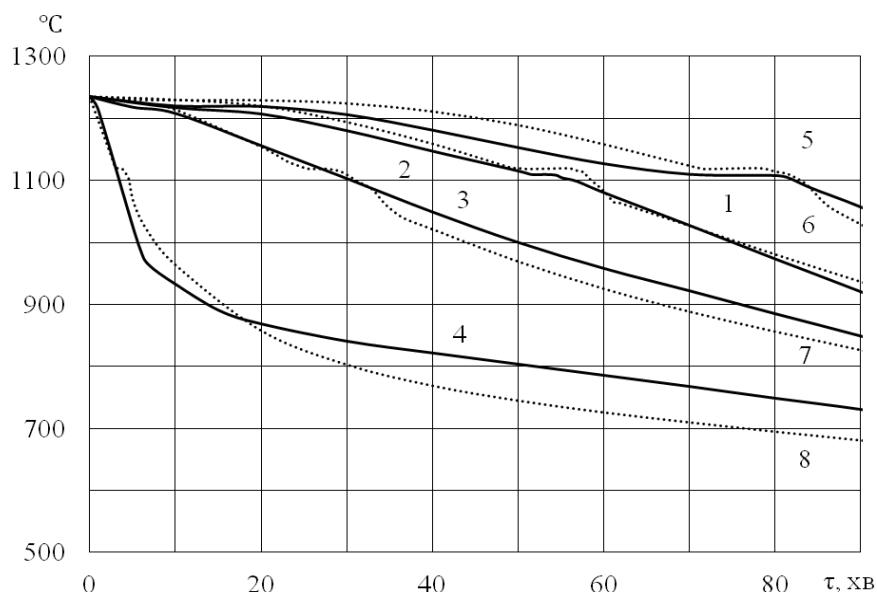


1...4 – експериментальні криві охолодження, що отримані за допомогою ХА термопар, встановлених на відстані 225, 150, 90, 17 мм відповідно від внутрішньої поверхні кокілю [53]; 5...8 – розрахункові криві охолодження, що отримані за допомогою бази даних LVMFlow по ливарним сплавам

Рисунок 4.6 – Експериментальні і розрахункові криві твердіння в радіальному напрямку бочки чавунного прокатного валка Ø450 мм

При інтенсивному обертанні металу теплота перегріву втрачається спочатку в піщано-глинистої формі нижньої шийки, потім в кокільній частині форми бочки, а далі в піщано-глинистих формах верхньої шийки і надливу Ø330 мм [53]. Жодна існуюча математична модель не враховує ці процеси. Тому, з бази даних вибрали чавун, вуглецевий еквівалент якого дорівнював хімічному складу прокатного валка масою 2200 кг і мав температуру ліквідус 1230 °С.

Результати моделювання наведені на рис. 4.7 у вигляді кривих охолодження віртуальних термопар №№ 5, 6, 7, 8, які відповідають точкам експериментального виміру ХА термопар №№ 1, 2, 3, 4, встановлених на відстані 225, 150, 90, 17 мм від внутрішньої поверхні кокілю, відповідно.



4, 8 – на відстані 17 мм від кокілю; 3, 7 – 90 мм; 2, 6 – 150 мм; 1, 5 – 225 мм

Рисунок 4.7 – Експериментальні 1...4 [53] і розрахункові 5...8 криві твердіння і охолодження бочки чавунного прокатного валка Ø450 мм після корегування теплофізичних коефіцієнтів

Для об'єктивної оцінки точності віртуальних і експериментальних кривих твердіння і охолодження виливків розраховували похибки температури на 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 90 хвилинах (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Результати аналізу похибки даних кривих охолодження експериментальних T_e і розрахункових T_p за базовими даними програми LVMFlow, що отримані з термопар, встановлених на відстані 17, 90, 150, 225 мм від внутрішньої поверхні кокїлю

Час, хв	$T_{e17},$ °C	$T_{p17},$ °C	Похибка, %	$T_{e90},$ °C	$T_{p90},$ °C	Похибка, %	$T_{e150},$ °C	$T_{p150},$ °C	Похибка, %	$T_{e225},$ °C	$T_{p225},$ °C	Похибка, %
5	1031	1029	0,17	1218	1222	0,31	1222	1230	0,65	1222	1230	0,65
10	933	927	0,64	1208	1183	2,09	1217	1225	0,62	1220	1230	0,82
20	869	820	5,68	1156	1111	3,86	1207	1186	1,74	1219	1220	0,12
30	841	762	9,41	1103	980	11,21	1180	1126	4,60	1206	1189	1,38
40	822	722	12,22	1049	903	13,96	1147	1045	8,89	1181	1135	3,86
50	804	691	14,07	1000	841	15,92	1115	962	13,71	1153	1106	4,09
60	786	664	15,53	958	786	18,00	1080	880	18,53	1127	952	15,50
70	768	638	16,89	922	737	20,06	1027	809	21,21	1110	862	22,35
80	749	613	18,15	885	694	21,56	973	752	22,74	1108	792	28,53
90	731	590	19,24	849	658	22,53	920	704	23,48	1057	736	30,36

Результати аналізу експериментальних (T_e) і розрахункових T_p даних, отриманих з термопар, встановлених на відстані 17, 90, 150, 225 мм від внутрішньої поверхні кокілью, відповідно, показали, що максимальні похибки становлять від 19,24 до 30,36%. Внаслідок цього використовувати результати моделювання твердіння чавунних прокатних валків у комбінованих кокільно-піщаних формах неможливо.

Для підвищення точності моделювання корегували величини показників теплофізичних властивостей сплаву: коефіцієнтів теплопровідності, теплоємності, густини, прихованої теплоти кристалізації, температури евтектоїдного фазового перетворення. Кількість варіантів розрахунку при адаптації моделі становила 28. Результати порівняння експериментальних вимірів з найкращим варіантом представлені на рис. 4.7.

Порівняння результатів експериментальних вимірів температури (T_e) охолодження валка Ø450 мм і розрахункових (T_p) даних показав зменшення похибки розрахунку з 19,2...30,4% до 1,8...6,8% (табл. 4.2). Основні результати корегування теплофізичних коефіцієнтів у базі даних програми LVMFlow наведені на рис. 4.8 та 4.9.

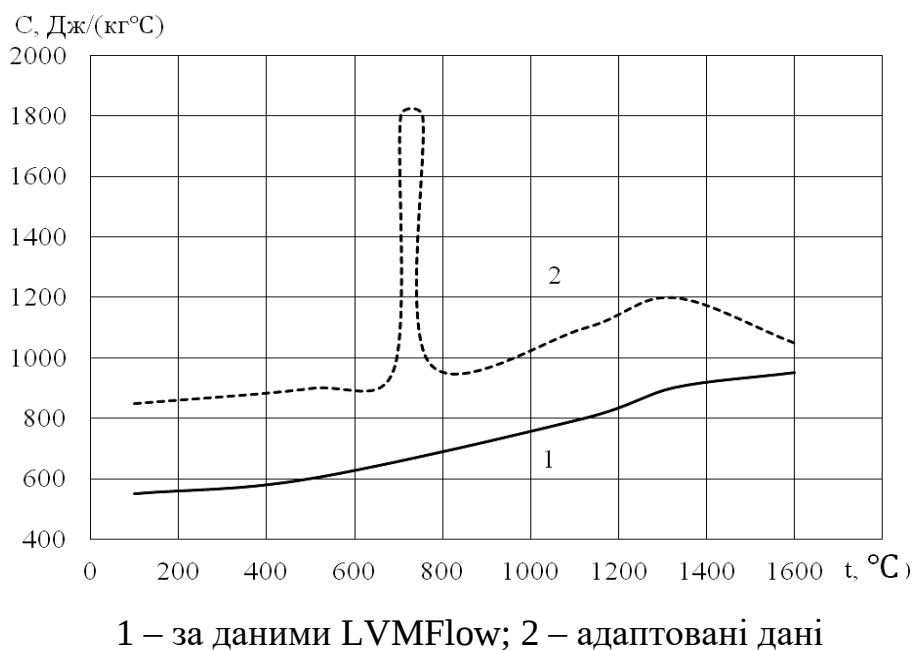


Рисунок 4.8 – Залежності від температури коефіцієнтів питомої теплоємності

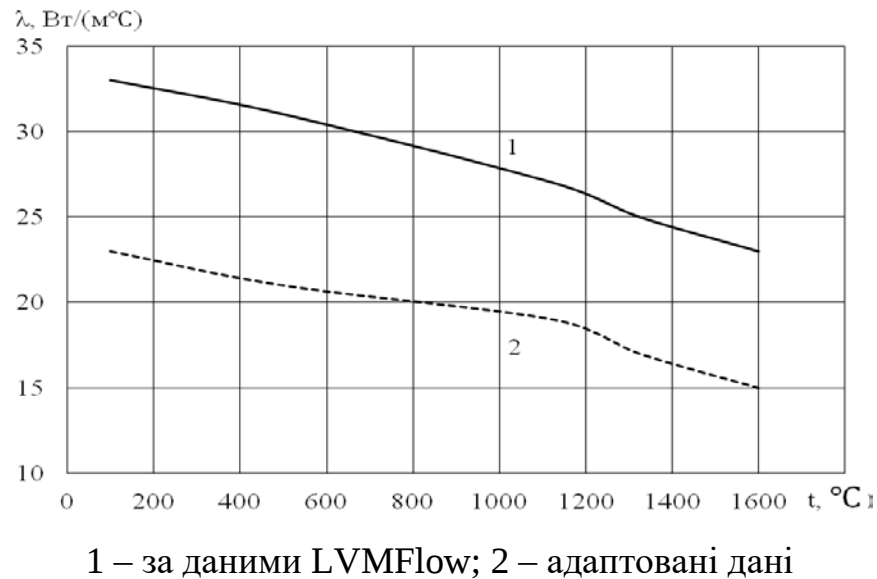


Рисунок 4.9 – Залежності від температури коефіцієнтів

У порівнянні з базою даних програми LVMFlow найбільше корегування здійснено для коефіцієнту питомої теплоємності при температурі евтектоїдного перетворення (див. рис. 4.8). Збільшення в $\approx 2,7$ рази питомої теплоємності в інтервалі температур 705...755 °C обумовлено результатами високотемпературного диференціального аналізу температури фазових перетворень зразків на глибині 10, 20, 40 мм від поверхні робочого шару валка [53]. В літературі абсолютні значення виділення прихованої теплоти евтектоїдного перетворення відсутні. Тому, в роботі встановили раціональні значення коефіцієнта питомої теплоємності, що забезпечило адаптацію моделі LVMFlow для твердіння і охолодження чавунних прокатних валків в комбінованих кокільно-піщаних ливарних формах. Слід відзначити, що вперше А.І. Вейник почав враховувати теплоту фазового перетворення в інтервалі температур кристалізації за рахунок збільшення коефіцієнту питомої теплоємності [108]. Аналогічний метод в реалізовано для евтектоїдного фазового перетворення в інтервалі температур 705...755°C для робочого шару чавунних прокатних валків, що дозволило провести адаптацію математичної моделі.

Таблиця 4.2 – Результати аналізу похибки даних кривих охолодження експериментальних T_e і розрахункових T_p за скорегованими значеннями теплофізичних коефіцієнтів, що отримані з термопар встановлених на відстані 17, 90, 150, 225 мм від внутрішньої поверхні кокільно

Час, хв	$T_{e17},$ °C	$T_{p17},$ °C	Похибка, %	$T_{e90},$ °C	$T_{p90},$ °C	Похибка, %	$T_{e150},$ °C	$T_{p150},$ °C	Похибка, %	$T_{e225},$ °C	$T_{p225},$ °C	Похибка, %
5	1031	1078	4,53	1218	1228	0,82	1222	1230	0,65	1222	1230	0,65
10	933	964	3,33	1208	1214	0,48	1217	1230	1,03	1220	1229	0,74
20	869	858	1,32	1156	1154	0,15	1207	1220	1,08	1219	1229	0,86
30	841	803	4,51	1103	1109	0,52	1180	1194	1,17	1206	1224	1,52
40	822	769	6,51	1049	1021	2,70	1147	1159	1,05	1181	1211	2,58
50	804	745	7,39	1000	969	3,07	1115	1120	0,46	1153	1189	3,10
60	786	726	7,64	958	925	3,48	1080	1083	0,27	1127	1158	2,78
70	768	710	7,55	922	888	3,66	1027	1027	0,02	1110	1124	1,25
80	749	695	7,26	885	856	3,30	973	981	0,78	1108	1114	0,52
90	731	681	6,84	849	826	2,70	920	937	1,85	1057	1029	2,64

Таким чином, була отримана похибка розрахунків до 6,8% у порівнянні з експериментальними дослідженнями дозволила застосувати програму LVMFlow для встановлення термочасових режимів теплоізоляції ливарної форми від навколишнього середовища для валків різних типорозмірів, а також для розрахунків нових конструкцій ливарних форм чавунних прокатних валків.

4.2.5 Визначення часу початку теплоізоляції ливарної форми чавунного прокатного валка від навколишнього середовища

Згідно обґрунтуванню (див. розділ 4.1) часу реалізації процесу гарячого посаду, який забезпечить зменшення рівня залишкових ливарних напружень, прийняли допущення, що в процесі затвердіння і охолодження валка теплоізоляцію кокілю необхідно здійснювати в момент закінчення евтектоїдного перетворення у робочому шарі. За допомогою програми LVMFlow, яку адаптували до процесу затвердіння чавунного прокатного валка в комбінованій кокільно-піщаній ливарній формі (див. розділ 4.2.4), визначили термочасові режими затвердіння і охолодження робочого шару валків завтовшки 20 і 50 мм. В цьому інтервалі товщин робочого шару відливають основні типорозміри чавунних прокатних валків [106].

Для чисельного моделювання проведено аналіз співвідношення товщини стінки кокілю (X_k) до діаметра бочки валка (D), яке використовують в умовах серійного виробництва на АТ «ДЗПВ» (табл. 4.3).

За даними табл. 4.3 встановлено функціональну залежність товщини кокілю к співвідношенню товщини кокілю і діаметра бочки валка ($X_k/D=f(X_k)$) (рис. 4.10) і показано, що даний спосіб управління швидкістю затвердіння чавуну найбільш ефективний для прокатних валків з діаметром бочки понад 221 мм. Це пояснюється тим, що відповідно до [106] товщина стінки кокілю по відношенню до діаметра бочки валків менше ніж 0,5 і, отже, такі кокілі припустимо розглядати як термічно тонке тіло.

Таблиця 4.3 – Діаметри бочок, товщини стінок кокілів і їх співвідношення на АТ «ДЗПВ»

Номер оснастки кокілю	Діаметр бочки (D), мм		Товщина стінки кокілю (X _к), мм	Співвідношення X _к / D	
	min	max		min	max
СКГ–1,2.01	150	220	150	0,68	1,00
СКГ–1,2.02	221	390	165	0,42	0,75
СКГ–1,2.03	391	450	170	0,38	0,43
СКГ–1,2.04	451	540	180	0,33	0,40
СКГ–1,05	541	730	200	0,27	0,37
СКГ–1,06	731	820	225	0,27	0,31

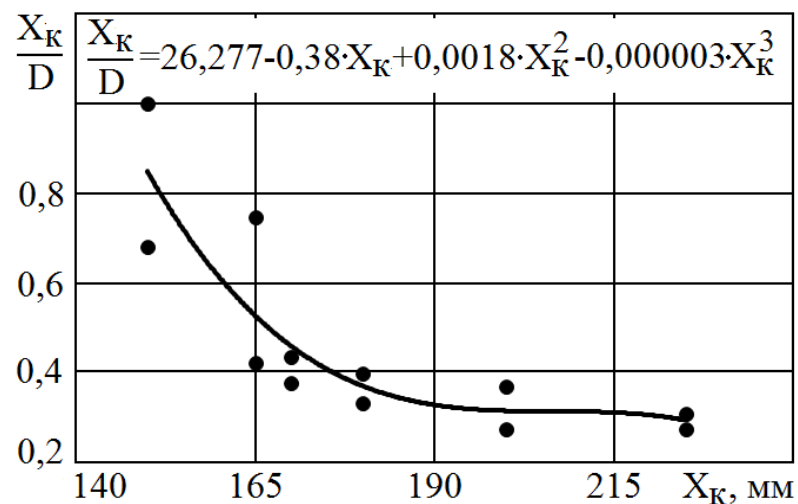
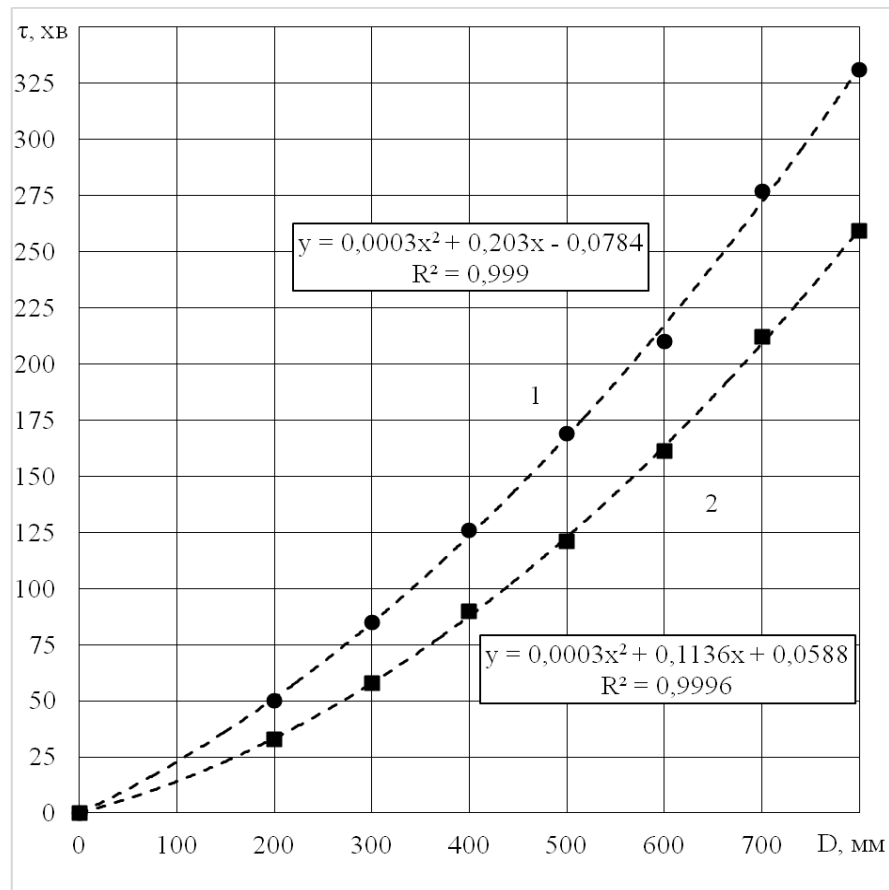


Рисунок 4.10 – Залежність товщини кокілю (X_к) к співвідношенню товщини кокілю і діаметру бочка валка (D)

Результати розрахунків охолодження робочого шару завтовшки 20 і 50 мм бочок чавунних прокатних валків в комбінованих кокільно-піщаних формах до температури евтектоїдного перетворення наведені на рис. 4.11.



1 – глибина вибіленого робочого шару в бочці 20 мм;

2 – глибина вибіленого робочого шару в бочці 50 мм

Рисунок 4.11 – Залежність часу (τ , хв) початку теплоізоляції ливарної кокільно-піщаної форми від діаметра бочки (D , мм) прокатного валка по температурі фазового евтектоїдного перетворення у робочому шарі

З аналізу ходу кривих на рис. 4.11 витікає, що при збільшенні діаметра бочки валка нелінійно збільшується час початку екранування.

Розрахунок процесу твердіння і охолодження експериментальної форми з розмірами бочки $\varnothing 400 \times 785$ мм (див. рис. 2.2, 3.4-3.6) визначили, що для отримання робочого шару товщиною 30 мм установку теплоізоляції на ливарній формі необхідно виконувати через 1 год 38 хв після її заливки. Це забезпечить зменшення залишкових ливарних напружень без суттєвого скорочення твердості робочого шару.

4.3 Термографічне дослідження твердіння та охолодження бочки теплоізовованого і серійного валків

Для спрощення аналізу вимірів зміну температури в часі зводили до одновимірної, розглядаючи твердіння і охолодження тільки в радіальному напрямку. Результати вимірювання температур ХА термопарами зареєстровані потенціометром КСП-4 і представлені на рис. 4.12 [109].

Інерційність показань потенціометра не дозволила зафіксувати температурні зупинки ліквідус і солідус на термопарах №№ 1...4. Це обумовлено високою швидкістю охолодження робочого шару і теплоємністю захисного ковпачка гарячого спаю термопари по відношенню до теплоємності самого робочого спаю.

Встановлено, що на 30 хв охолодження робочий шар затвердів, а температура чавуну на глибині 20 мм від поверхні кокільу теплоізовованого і серійного валків дорівнювала 950 і 957 °С, а на глибині 60 мм – 1110 і 1115 °С, відповідно. Незначна розбіжність показників, отриманих з ХА термопар, перебувала в межах похибки вимірювання (див. розд. 2).

Через 1 годину охолодження температура чавуну у бочці на глибині 20 мм від поверхні кокільу експериментального і серійного валків складала 855 і 859 °С, а на глибині 60 мм – 920 і 925 °С, відповідно.

Згідно результатів моделювання (див. рис. 4.11) для отримання в кокільі Ø400 мм робочого шару товщиною 30 мм розміщення теплоізоляційного пристрою на ливарній формі необхідно виконувати через 1 год 38 хв після закінчення заливки розплав у ливарну форму. Зменшення теплопередачі в навколишнє середовище від кокільу зменшить перепад температури між центральною частиною та робочим шаром бочки і забезпечить зменшення залишкових ливарних напружень. Але в цьому випадку частка третинного цементиту не братиме участі в формуванні зносостійкого робочого шару прокатного валка, що призведе до зменшення твердості чавуну.

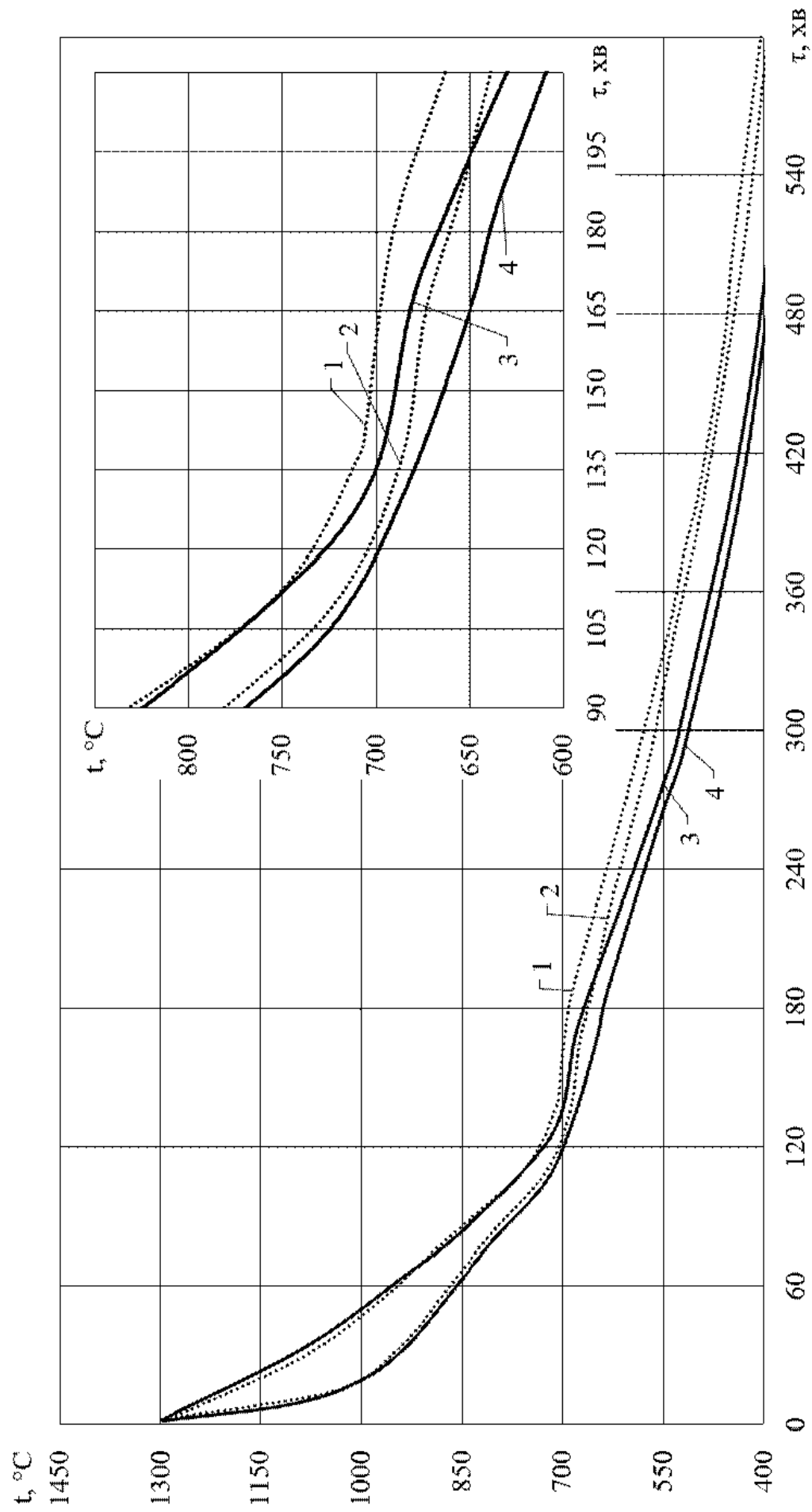


Рисунок 4.12 – Температури твердіння і охолодження бочки експериментального (1, 2) і серійного (3, 4) валків з ХА термопар №№ 1, 3, встановлених на відстані 20 мм, 1 – №№ 2, 4 – на відстані 60 мм

Аналіз залежностей (рис. 4.12), показує, що до температури ≈ 700 °С швидкості охолодження експериментального і серійного валків (табл. 4.3) [110] практично однакові, а після установки теплоізоляційного пристрою на ливарної формі валка швидкість охолодження знижується на $\approx 23...24\%$ в порівнянні з серійним. Це підтверджує ефективність використання нового технологічного процесу гарячого посаду для чавунних прокатних валків, які виготовляються в комбінованих кокільно-піщаних ливарних формах.

Таблиця 4.3 – Вплив теплоізоляції бочки валка Ø390 мм від навколишнього середовища на швидкість охолодження теплоізованого і серійного валків на глибині 20 мм (термопари № 1, 3) і 60 мм (термопари № 2, 4), відповідно

Температурний інтервал, °С	Швидкість охолодження валка (град/хв) на відстані від поверхні бочки			
	20 мм		60 мм	
	№ 1 тепло-ізований	№ 3 серійний	№ 2 тепло-ізований	№ 4 серійний
1390–700	4,79	4,93	5,52	5,75
700–400	0,66	0,86	0,65	0,86

4.4 Порівняння залишкових ливарних напружень в теплоізованому і серійних валках

Величину залишкових напружень визначали на бочках прокатних валків (№ 9097 – теплоізованого і № 8038 – серійного) з хімічним складом, мас. %: С 3,59; Si 0,61; Mn 0,53; P 0,051; S 0,024; Cr 0,64; Ni 1,65; Mo 0,024; Cu 0,12, а також валка № 91412 серійного виробництва виконання СПХН-60 з хімічним складом, мас. %: С 3,55; Si 0,60; Mn 0,51; P 0,053; S 0,022; Cr 0,62; Ni 1,63; Mo 0,022; Cu 0,10, який заливали в аналогічне кокільно-опочне оснащення.

Вимірювали напруження в бочці валків в трьох точках на куті 120° (див. рис. 2.3) і в площинах, що знаходяться на відстані 100 мм (№№ 3.1, 3.2, 3.3) і 105 мм (№№ 5.1, 5.2, 5.3) від нижнього і верхнього торця, відповідно, а також на половині висоті бочки (№№ 4.1, 4.2, 4.3). Результати вимірювання наведені в табл. 4.4 [111].

Таблиця 4.4 – Коерцитивна сила в прокатних валках з вибіленого чавуну, отриманих за серійною і експериментальною технологією

Валок	Номер валка	Коерцитивна сила, А/см			
		В бочці валка в точках № (див. рис. 2.3)			Середнє арифметичне значення за трьома точкам
		3	4	5	
Теплоізолюваний без термообробки	9097	6,5	6,3	6,3	6,36
Серійний без термообробки	8038	6,9	6,7	6,8	6,80
Серійний до термообробки	91412	6,8	6,7	6,8	6,76
Серійний після термообробки		6,1	6,0	6,2	6,10

Зіставлення отриманих результатів показало, що теплоізоляція ливарної форми, яка була проведена в заданий час процесу охолодження теплоізолюваного валка №9097, сприяло зниженню залишкових ливарних напружень на 6,4% в порівнянні з напруженнями в валку серійного виробництва №8083.

У той же час, в умовах серійного виробництва регульовані нагрівання і охолодження в термічній печі спочатку остиглого валка №91412 по режиму: нагрів до 600°C ; ізотермічна витримка протягом 10 годин; охолодження з піччю – забезпечувала зменшення залишкових ливарних напружень на 10,2%, що порівняно з величиною, отриманою в теплоізолюваному валку. У

валках № 9097 і № 8038 збільшують напруження датчики температури (див. рис. 2.2), що складаються з кварцової трубки з подовженим наконечником, тонкостінної трубки з нержавіючої сталі і теплоізоляційного шару азбестового шнура. Крім того, важко врахувати жорстке кріплення датчиків температури до кокілю і їх вплив на підвищення напружень.

Не зважаючи на теплоізоляцію від навколишнього середовища всієї ливарної форми напружений стан в нижній шийці експериментального і серійного валків суттєво не відрізнялися, про що свідчить хід кривих на рис. 4.13, а у верхній шийці і надливі зафіксовано зменшення коерцитивної сили.

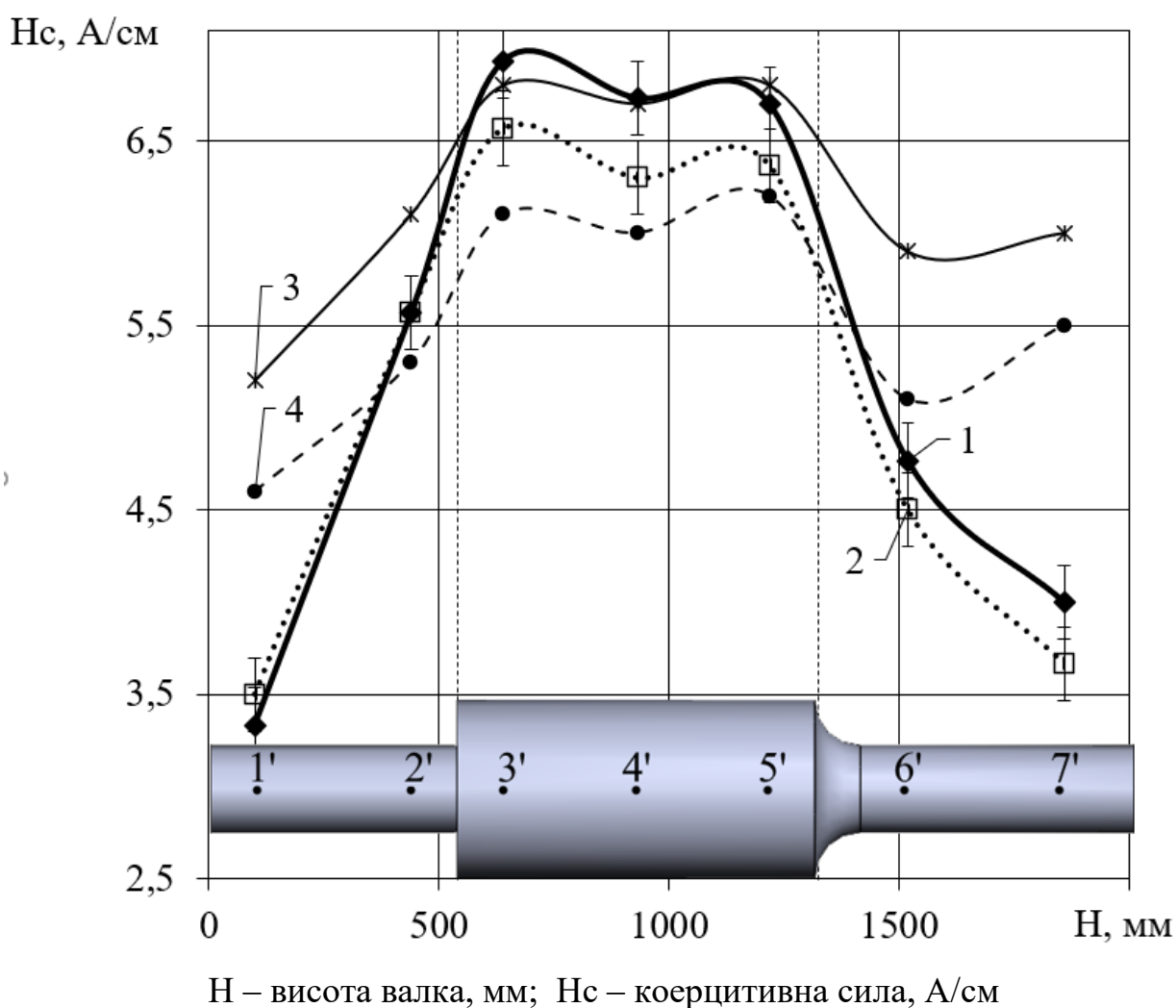


Рисунок 4.13 – Коерцитивна сила в шийках і бочках серійного (1) та теплоізольованого (2) валків, серійного до відпалу (3) та після відпалу (4)

Такі результати обумовлені повільним охолодженням шийок у піщаних формах, коефіцієнт акумуляції теплоти яких $b_{\phi} \approx 1377 \text{ Вт} \cdot \text{с}^{0,5} / \text{м}^2 \cdot \text{К}$ [53], що у вісім разів менше, ніж у кокілю з сірого чавуну $b_{\phi} \approx 11000 \text{ Вт} \cdot \text{с}^{0,5} / \text{м}^2 \cdot \text{К}$ [103], в якому твердіє бочка.

У верхній шийці і надливі зменшення коерцитивної сили пов'язане з теплоізоляцією дзеркала метала надливу теплоізованого валка від навколишнього середовища і уповільненням швидкості охолодження. Цей позитивний фактор використання гарячого посаду у подальшому потребує додаткових досліджень у зв'язку з роботою надливу.

4.5 Дослідження умов утворення усадкової раковини в нижній шийці валків

Адаптація математичної моделі до експериментальних термографічних досліджень твердіння та охолодження чавунних прокатних валків в комбінованих кокільно-піщаних ливарних формах дозволяє розробляти і удосконалювати технологічні процеси лиття чавунних прокатних валків. Так, одним із видів браку валків є усадкова раковина в області сполучення бочки і нижньої шийки. Її виникнення обумовлено порушенням послідовності затвердіння розплаву в елементах валка в напрямі від нижньої шийки до бочки, від бочки до верхньої шийки і надливу. Тобто, відбувається більш раннє затвердіння розплаву бочки в кокілі – елемента вилівка, через який живиться усадка нижньої шийки від надливу.

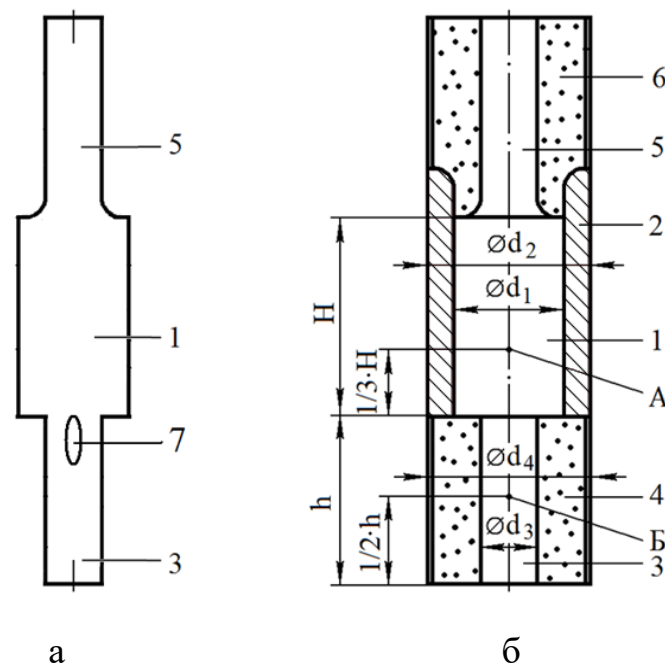
Виходячи з цього, умовою попередження виникнення усадочною раковини в нижній шийці валка прийняли наступне співвідношення:

$$K_{400} = \frac{\tau_{s(\phi)}}{\tau_{s(H)}} \geq 1, \quad (4.1)$$

де $\tau_{s(\phi)}$, $\tau_{s(H)}$ – час затвердіння розплаву в бочці і нижній шийці валка відповідно

При цьому, досягаючи виконання співвідношення (4.1) на практиці слід враховувати ще одну особливість прокатних валків – регламентування структури чавуну у всіх його елементах. Тобто, в шийках валків неприпустимі наявність вибіленими шару і усадочних раковин, в бочці повинен бути вибілений шар регламентованої товщини і серцевина з сірого чавуну. Виходячи з цього, технічне рішення щодо попередження виникнення усадочної раковини в нижній шийці має бути компромісним і забезпечити виконання вимог до якості валків в повному обсязі.

З метою встановлення закономірностей і умов виникнення усадочної раковини в нижній шийці валка використовували дані комп'ютерного моделювання, промислового експерименту і параметричного критерію, складеного на основі аналізу існуючих аналітичних залежностей з використанням елементів теорії подібності, а також схеми валка, представленої на рис. 4.14.



1 – бочка валка; 2 – кокінь; 3 – нижня шийка валка; 4 – форма нижній шийки;
5 – верхня шийка; 6 – форма верхній шейки; 7 – усадочна раковина

Рисунок 4.14 – Схема розташування усадочної раковини в нижній шийці валка (а) і основні елементи ливарної форми (б)

У вальцеливарному цеху АТ «ДЗПВ» надливом виливку є подовжена частина верхньої шийки [108]. Тому згідно з наведеної схеми умовою отримання валка без усадочних раковин буде вираз:

$$\tau_5 > \tau_1 > \tau_3, \quad (4.2)$$

де τ_5 , τ_1 , τ_3 – час затвердіння, відповідно, верхньої шийки, бочки і нижньої шийки валка

Відповідно до теорії затвердіння виливків прийнято вважати, що реально процес фільтраційного масопереносу розплаву до фронту затвердіння завершується при утриманні $\approx 30-60\%$ за обсягом рідкої фази в області двофазного стану сплаву виливка [108, 112-115]. Проте, для комп'ютерного розрахунку K_{400} (див. 4.1) в якості реперної крапки розрахунків була прийнята температура солидус чавуну. Таке рішення обумовлене припущенням, відповідно до якого, з точки зору відносного часу досягнення прийнятої температури, їх відносні величини постійні для незмінних умов тепловідведення від виливка. У зв'язку з цим при проведенні комп'ютерного моделювання гарячі спаї термопар розміщували відповідно до схеми (див. А, Б на рис. 4.14 б).

Складність математичного опису та отримання аналітичних залежностей тривалості затвердіння виливків прокатних валків складається в багатофакторної залежності цього процесу, що обумовлено неоднорідністю і конфігурацією матеріалу комбінованої ливарної форми, її значною металоємністю, умовами заповнення розплавом, відносно невеликою товщиною стінок кокільів тощо. У зв'язку з цим, за результатами досліджень Альберт-Віктора Йозефовича Вейніка, Геннадія Анатольовича Анісовіча, Андрія Анатольовича Бочвара, Анатолія Григоровича Спаського та інших вчених і дослідників для розрахунку співвідношення часу затвердіння чавуну

в бочці (див. А на рис. 4.14 б) і в нижній шийці (див. Б на рис. 4.14 б) був розроблений наступний параметричний критерій K_{400} :

$$K_{400} = f \cdot \left(\frac{b_2}{b_4}\right)^{0,2} \cdot \left(\frac{d_1}{d_3}\right)^{1,5} \cdot \frac{\left(\frac{b_4^2 \cdot d_4^2 \cdot d_3^2}{b_2^2}\right)^{0,2}}{\left(\frac{d_2^2}{d_1^2} - 0,75\right)^{0,2}}, \quad (4.3)$$

де f – коефіцієнт пропорційності, що враховує інтенсивність тепловіддачі із зовнішнього боку форми ($f=0,0038$);

b_2, b_4 – коефіцієнти 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.

$$b = \sqrt{\rho \cdot c \cdot \lambda}, \quad (4.4)$$

де ρ – густина;

c – питома теплоємність;

λ – коефіцієнт теплопровідності.

Як і для будь-якої іншої комп'ютерної програми спочатку проводили її адаптацію до конкретних умов виробництва виливків. Метою адаптації була необхідність адекватної порівняльності результатів комп'ютерного моделювання та експерименту. З цією метою, виходячи з умов розв'язуваної задачі, провели термографування реального валка, реєструючи зміну його температури в осьовій частині бочки. Отримані дані використовували для визначення поправочного коефіцієнта експериментальних і комп'ютерних

даних в температурному інтервалі від температури заливки чавуну до температури солідус.

Встановлено, що реальна температура в центрі циліндричного виливка (валка) при охолодженні металу від температури заливки до температури солідус за результатами комп'ютерного моделювання може бути розрахована за формулою:

$$t_p = t_k \cdot (1 - 0,0021 \cdot \tau + 0,00008 \cdot \tau^2), \quad (4.5)$$

де t_k – температура за результатами комп'ютерного моделювання, °C;

τ – час охолодження виливка у формі, хв.

Результати експериментальних t_e , комп'ютерних t_k і розрахункових t_p за наведеною формулою (4.5) значень, а також похибки між експериментальними і розрахунковими значеннями температур в осьовій частині валка наведені в табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Результати визначення і розрахунку значень температур в осьовій частині валка

Час, хв	t_e , °C	t_k , °C	t_p , °C	$100(t_e - t_p) / t_e, \%$
5	1222	1230	1219,5	0,2
10	1220	1230	1214,0	0,5
20	1219	1220	1207,8	0,9
30	1206	1189	1199,7	0,5
40	1181	1135	1184,9	-0,3

Аналіз даних табл. 4.5 показує, що використання розробленого поправочного коефіцієнта дозволяє розраховувати величину температури в чавуну у вказаному вище інтервалі з похибкою не більше 1%. В зв'язку з цим

формулу (4.5) використовували в подальших розрахунках при адаптації і інтерпретації результатів комп'ютерного моделювання.

Вихідні дані і результати розрахунків критерію K_{400} по рівнянню (4.3) і за програмою LVMFlow для форми нижньої шийки валка на основі кварцового піску приведені в табл. 4.6, а для цирконієвого піску – в табл. 4.7.

Таблиця 4.6 – Вихідні дані і результати розрахунку K_{400} для форми нижньої шийки валка на основі кварцового піску

№ з/П	d_1 , мм	d_2 , мм	d_3 , мм	d_4 , мм	b_2	b_4	Розрахункові величини K_{400}		ОШ, %
					$B_T \cdot c^{0,5} / (m^2 \cdot \text{град})$		рівняння (4.3)	LVM- Flow	
1	300	700	200	700	12850	990	0,35	0,35	+1,4
2	400	700	200	700	12850	990	0,62	0,62	+1,1
3	500	700	200	700	12850	990	0,99	1,03	-4,2
4	400	700	100	700	12850	990	1,33	1,23	+8,1
5	400	700	200	700	12850	990	0,62	0,62	+1,1
6	400	700	300	700	12850	990	0,40	0,45	-11,7
7	400	700	200	700	12850	990	0,62	0,62	+1,1
8	400	600	200	700	12850	990	0,68	0,64	+6,1
9	400	500	200	700	12850	990	0,77	0,77	-0,8

Примітка. ОШ – відносна різниця між даними, розрахованими по рівнянню (4.3) і за програмою LVMFlow

Аналіз даних табл. 4.6 і 4.7 показав, що використання розробленого критерію K_{400} дозволяє з похибкою не більше 9% розраховувати співвідношення шуканих значень часу твердіння чавуну у валках.

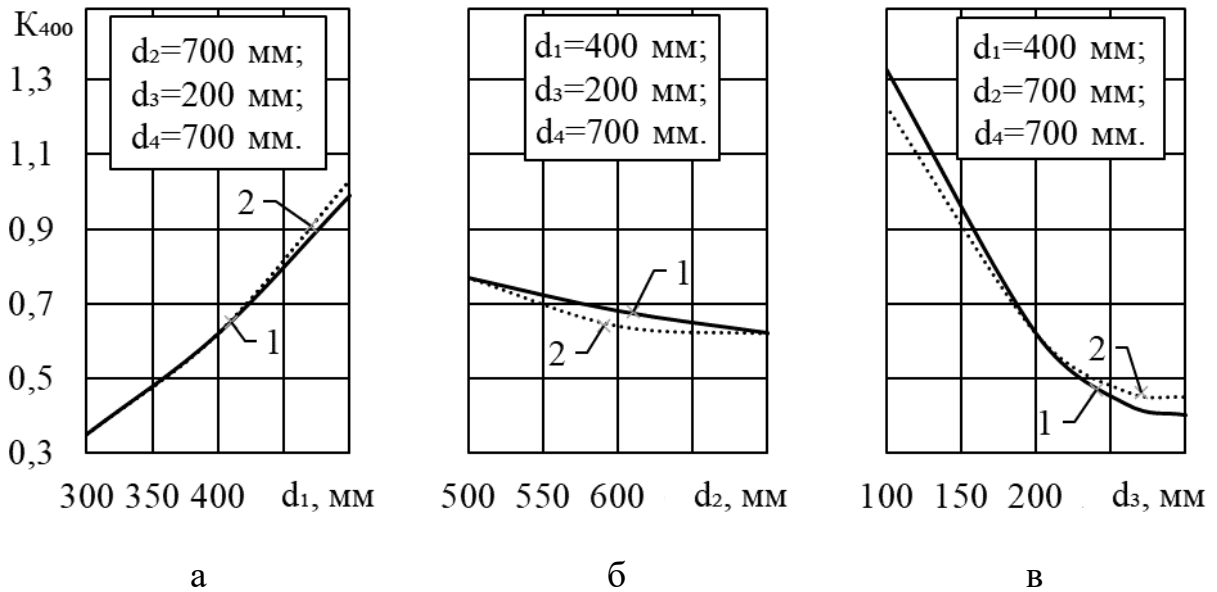
Таблиця 4.7 – Початкові дані і результати розрахунку K_{400} для форми нижньої шийки валка на основі цирконієвого піску

№ з/П	d_1 , мм	d_2 , мм	d_3 , мм	d_4 , мм	b_2	b_4	Розрахункові величини K_{400}		ОШ, %
					Вт·с ^{0,5} /(м ² ·град)		рівняння (4.3)	LVM- Flow	
1	300	700	200	700	12850	1380	0,38	0,38	-0,9
2	400	700	200	700	12850	1380	0,67	0,68	-1,5
3	500	700	200	700	12850	1380	1,06	1,12	-5,8
4	400	700	100	700	12850	1380	1,43	1,51	-5,2
5	400	700	200	700	12850	1380	0,67	0,68	-1,5
6	400	700	300	700	12850	1380	0,43	0,47	-9,0
7	400	700	200	700	12850	1380	0,67	0,68	-1,5
8	400	600	200	700	12850	1380	0,73	0,70	3,6
9	400	500	200	700	12850	1380	0,82	0,84	-2,2

Примітка. ОШ – відносна різниця між даними, розрахованими по рівнянню (4.3) і за програмою LVMFlow

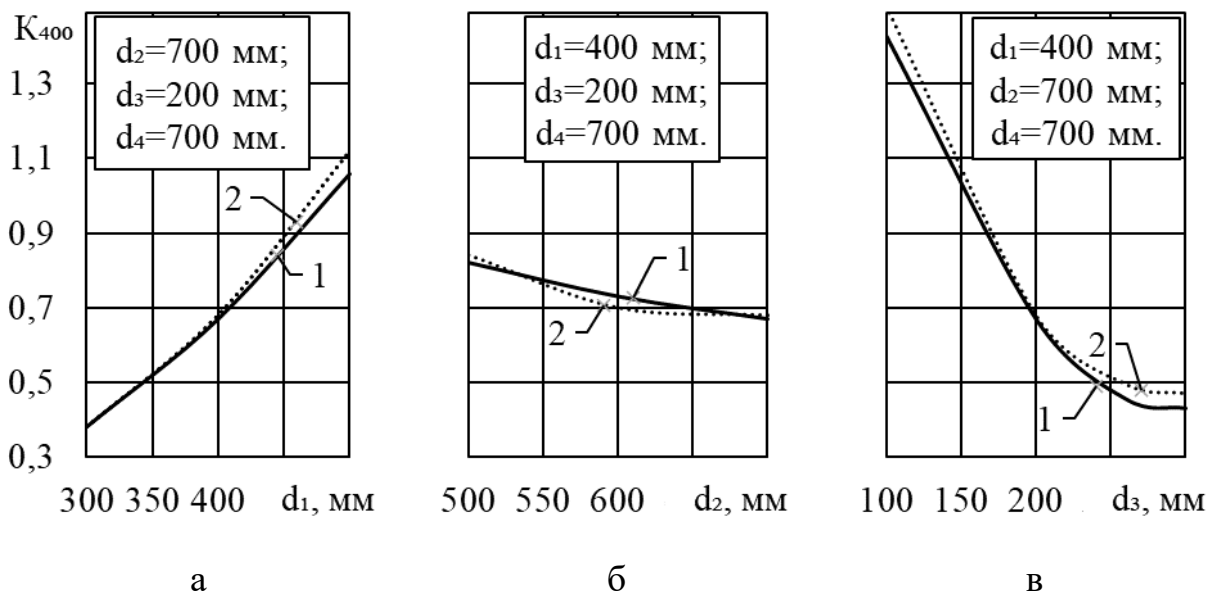
Ця обставина дозволяє рекомендувати критерій K_{400} в якості показника технологічності валків, що виготовляються в комбінованих формах і мають вказані вище межі зміни своїх геометричних розмірів.

Залежності критерію K_{400} від зовнішнього діаметру кокілю при його зміні від 500 до 700 мм, діаметра бочки валка від 300 до 500 мм і діаметра нижньої шийки від 100 до 300 мм при використанні формувальної суміші на основі кварцового піску для форми нижньої шийки представлено на рис. 4.15, а на основі цирконієвого піску – на рис. 4.16.



1 – розрахунок за програмою LVMFlow; 2 – розрахунок по рівнянню (4.3)

Рисунок 4.15 – Залежність критерію K_{400} від зовнішнього діаметра кокілю (а), діаметра бочки валка (б) і діаметра нижньої шийки (в) при використанні формувальної суміші на основі кварцового піску для форми нижньої шийки



1 – розрахунок за програмою LVMFlow; 2 – розрахунок по рівнянню (4.3)

Рисунок 4.16 – Залежність критерію K_{400} від зовнішнього діаметра кокілю (а), діаметра бочки валка (б) і діаметра нижньої шийки (в) при використанні формувальної суміші на основі цирконієвого піску для форми нижньої шийки

Аналіз ходу залежностей (рис. 4.15 і 4.16) показує, що зі збільшенням внутрішнього діаметра кокілю (бочки валка) коефіцієнт K_{400} збільшується в той час, як зміна товщини кокілю бочки валка не чинить істотного впливу на нього. Збільшення ж внутрішнього діаметру форми нижньої шийки валка негативно позначається на значенні коефіцієнта K_{400} , зменшуючи його величину. Заміна формувальної суміші на основі кварцового піску на формувальну суміш на основі цирконового піску привела (на суміш з вищою теплоакумулюючою здатністю) до збільшення коефіцієнта K_{400} . Проте, цього збільшення виявилось недостатньо для попередження виникнення усадочної раковини в нижніх шийках валків.

При цьому слід зазначити, що зміна рівня теплофізичних властивостей формувальної суміші для нижньої шийки валка в межах використання відомих вогнетривких неметалевих матеріалів не дозволить досягти виконання умови (4.1), що виходить з аналізу ходу залежності, приведеної на рис. 4.17.

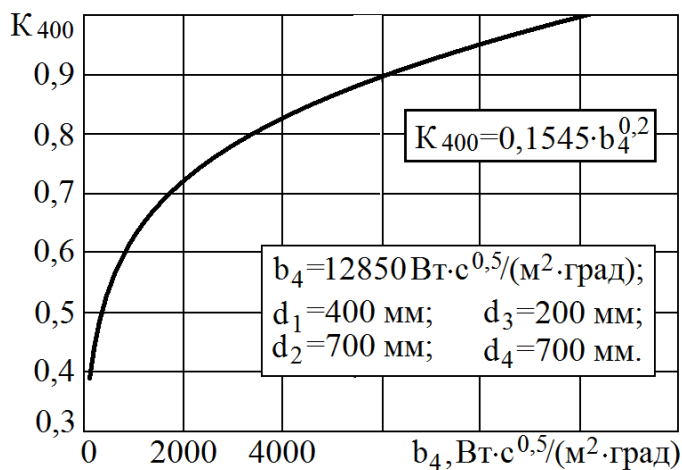


Рисунок 4.17 – Залежність критерію K_{400} від коефіцієнту теплоакумулюючої здатності формувальної суміші нижньої шийки валка

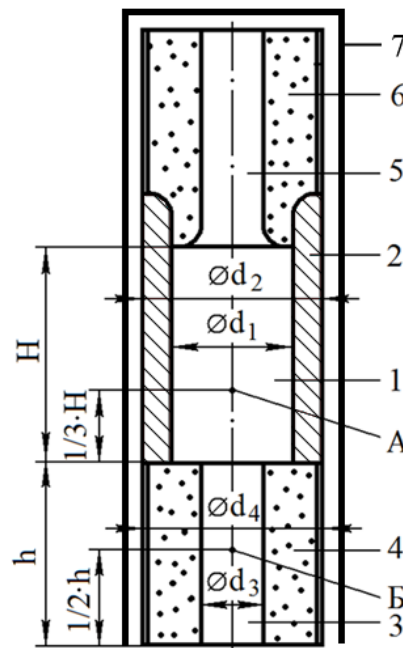
Виходячи з викладеного, а також з того факту, що використовувані для виробництва валків кокілі, по відношенню до діаметра бочки валків, є термічно товстими тілами, а також того, що розташування екрану між навколишнім середовищем і випромінюючої тепло поверхнею знижує

тепловий потік в навколишнє середовище в два рази, провели розрахунок величин критерію K_{401} , величину якого за аналогією з критерієм K_{400} розраховували за рівнянням:

$$K_{401} = f \cdot \left(\frac{b_2}{b_4} \right)^{0,2} \cdot \left(\frac{d_1}{d_3} \right)^{1,5} \cdot \frac{\left(\frac{b_4^2 \cdot d_4^2 \cdot d_3^2}{b_2^2} \right)^{0,2}}{\left(\frac{d_2^2}{d_1^2} - 0,75 \right)^{0,12}}, \quad (4.6)$$

де f – поправочний коефіцієнт, який враховує інтенсивність тепловіддачі із зовнішнього боку форми ($f=0,0057$).

Схема екранованої ливарної форми для комп'ютерного моделювання процесу затвердіння валка представлена на рис. 4.18.



1 – бочка валка; 2 – кокіль; 3 – нижня шийка валка; 4 – форма нижньої шийки валка; 5 – верхня шийка валка; 6 – форма верхньої шийки валка; 7 – екран ливарної форми

Рисунок 4.18 – Схема екранованої ливарної форми для комп'ютерного моделювання процесу затвердіння валка

Результати розрахунків представлені в табл. 4.8 і 4.9, відповідно, для форми на основі кварцового і цирконієвого піску.

Таблиця 4.8 – Вихідні дані та результати розрахунку K_{401} для форми нижньої шийки валка на основі кварцового піску (ливарна форма екранована)

П/П	d_1 , мм	d_2 , мм	d_3 , мм	d_4 , мм	b_2	b_4	Розрахункові величини K_{401}		ОШ, %
					Вт·с ^{0,5} /(м ² ·град)		рівняння (4.3)	LVM- Flow	
1	300	700	200	700	12850	990	0,60	0,57	+4,3
2	400	700	200	700	12850	990	1,00	1,00	-0,5
3	500	700	200	700	12850	990	1,51	1,55	-2,7
4	400	700	100	700	12850	990	2,14	2,06	+3,8
5	400	700	200	700	12850	990	1,00	1,00	-0,5
6	400	700	300	700	12850	990	0,64	0,69	-6,8
7	400	700	200	700	12850	990	1,00	1,00	-0,5
8	400	600	200	700	12850	990	1,05	1,04	+0,9
9	400	500	200	700	12850	990	1,13	1,22	-7,4

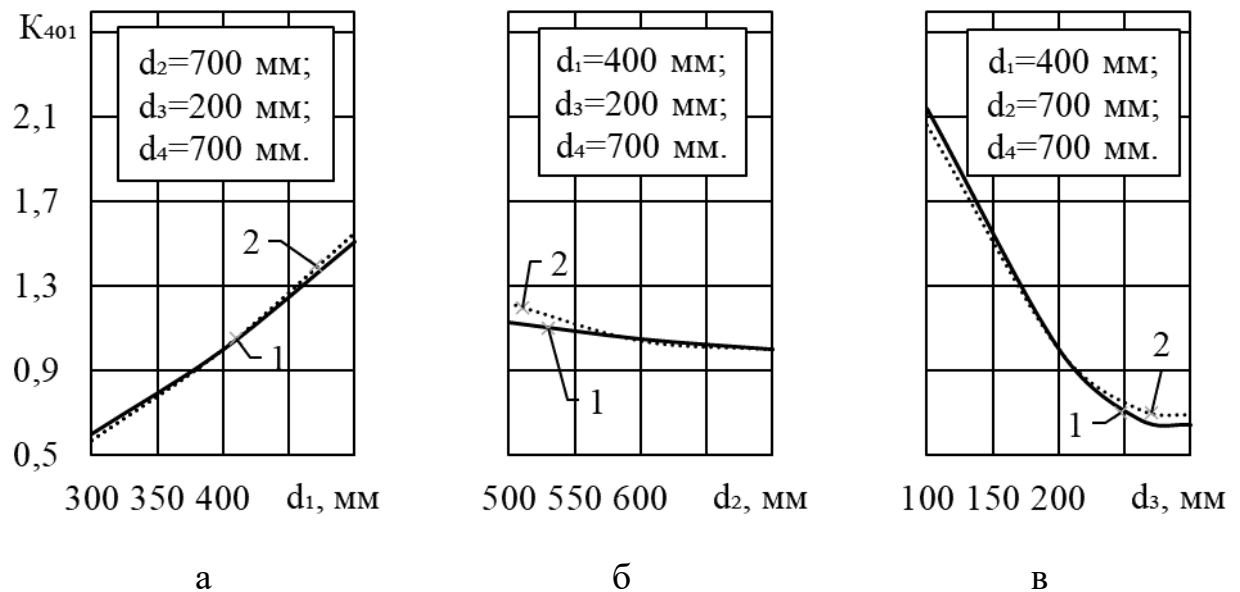
Примітка. ОШ – відносна різниця між даними, розрахованими за рівнянням (4.6) і за програмою LVMFlow

Таблиця 4.9 – Вихідні дані та результати розрахунку K_{401} для форми нижньої шийки валка на основі цирконієвого піску (ливарна форма екранована)

П/П	d_1 , мм	d_2 , мм	d_3 , мм	d_4 , мм	b_2	b_4	Розрахункові величини K_{401}		ОШ, %
					Вт·с ^{0,5} /(м ² ·град)		рівняння (4.3)	LVM- Flow	
1	300	700	200	700	12850	1380	0,64	0,62	+1,9
2	400	700	200	700	12850	1380	1,07	1,10	-3,0
3	500	700	200	700	12850	1380	1,61	1,69	-4,3
4	400	700	100	700	12850	1380	2,29	2,51	-9,0
5	400	700	200	700	12850	1380	1,07	1,10	-3,0
6	400	700	300	700	12850	1380	0,68	0,71	-3,9
7	400	700	200	700	12850	1380	1,07	1,10	-3,0
8	400	600	200	700	12850	1380	1,12	1,14	-1,5
9	400	500	200	700	12850	1380	1,21	1,33	-8,7

Примітка. ОШ – відносна різниця між даними, розрахованими за рівнянням (4.6) і за програмою LVMFlow

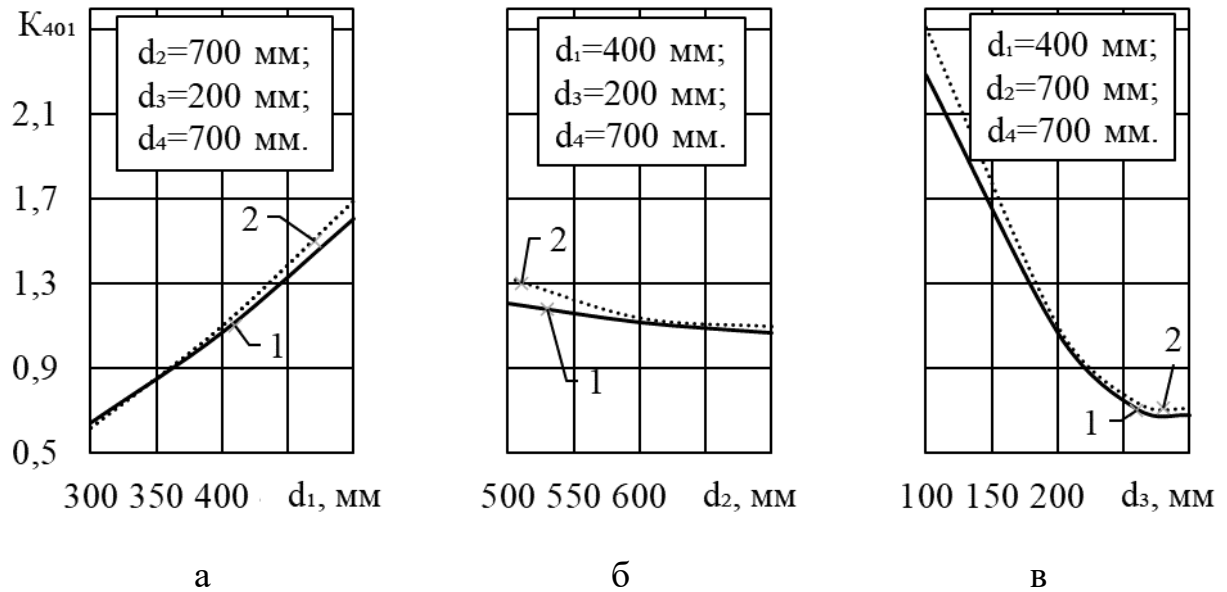
Залежності критерію K_{401} від зовнішнього діаметра кокілю при його зміні від 500 до 700 мм, діаметра бочки валка від 300 до 500 мм і діаметра нижньої шийки від 100 до 300 мм при використанні формувальної суміші на основі кварцового піску для форми нижньої шийки представлені на рис. 4.19, а на основі цирконієвого піску – на рис. 4.20.



1-розрахунок за програмою LVMFlow; 2 - за рівнянням (4.6)

Рисунок 4.19 – Залежність критерію K_{401} від зовнішнього діаметра кокілю (а), діаметра бочки валка (б) і діаметра нижньої шийки (в) при використанні формувальної суміші на основі кварцового піску для форми нижньої шийки

Аналіз ходу залежностей (рис. 4.19 і рис. 4.20) показує, що використання такого способу управління процесом затвердіння виливка, як екранування форми при затвердінні валка, робить істотний вплив на швидкість просування фронту затвердіння в його бочці, знижуючи її і практично не впливаючи на швидкість затвердіння чавуну в нижній шийці валка. З цього випливає, що екранування валкових форм може дозволити розширити номенклатуру типорозмірів сортопрокатних валків, що виготовляються без усадочної раковини в їх нижніх шийках.

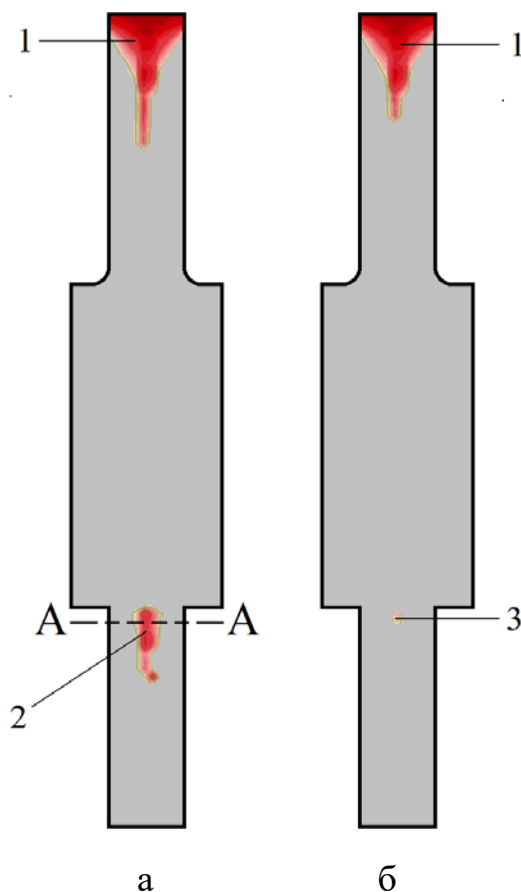


1 – розрахунок за програмою LVMFlow; 2 – за рівнянням (4.6)

Рисунок 4.20 – Залежність критерію K_{401} від зовнішнього діаметра кокілю (а), діаметра бочки валка (б) і діаметра нижньої шийки (в) при використанні формувальної суміші на основі цирконієвого піску для форми нижньої шийки

Графічне представлення результатів комп'ютерних розрахунків по виду і розташуванню усадочних дефектів у валках з діаметром бочки 400 мм і діаметром шийок 200 мм дано на рис. 4.21, а, б.

Аналіз зображень на рис. 4.21 показує, що результати комп'ютерного моделювання та розрахунків за критеріями K_{400} і K_{401} адекватно описують характер усадочних дефектів, що утворюються в нижній шийці. При цьому, екранування валкової комбінованої форми в певний момент часу затвердіння розплаву в бочці дозволяє попереджати появу в нижній шийці усадочної раковини.



1 – усадкова раковина в надливі валка; 2 – усадкова раковина в нижній шийці валка; 3 – пухкість у нижній шийці валка

Рисунок 4.21 – Розташування усадочних дефектів у валках, відлитих за прийнятою на підприємстві технологією (а) та технологією з екрануванням ливарної форми (б)

4.6 Висновки

1. Розроблені основні положення реалізації технології по зменшенню рівня залишкових ливарних напружень за рахунок регулювання процесу охолодження чавунних прокатних валків в ливарній формі, які забезпечать зменшення перепаду температури по радіусу бочки валка. Встановлено, що в процесі затвердіння і охолодження валка зменшення теплопередачі в навколишнє середовище від кокілю необхідно здійснювати

тільки в момент закінчення евтектоїдного перетворення у чавуні робочого шару.

2. Обґрунтовано температурний режимів роботи матеріалу теплоізоляції і розроблено конструкцію пристрою для виконання гарячого посаду виливків чавунних прокатних валків.

3. Виконана адаптація математичної моделі LVMFlow до експериментальних термографічних досліджень твердіння та охолодження валків в комбінованих кокільно-піщаних ливарних формах за рахунок корегування бази даних теплофізичних коефіцієнтів.

4. Виконано експериментальні дослідження впливу теплоізоляції ливарної форми на температуру твердіння та охолодження теплоізолізованого та серійного валків. Розміщення ливарних форм валків на двомісному піддоні забезпечило єдину сифонну ливникову систему з тангенціальним підведенням живильників до нижніх шийок, а розміщення гарячих спаїв хромель-алюмелевих термопар на відстані 20 і 60 мм від поверхні кокілю відповідало мінімальній і максимальній товщині робочого шару бочки при литті в стаціонарні ливарні форми.

5. За результатами розрахунків адаптованої програми LVMFlow встановлено, що час розміщення пристрою з теплоізоляцією на залиту експериментальну ливарну форму з діаметром кокілю 400 мм дорівнює 1 год 38 хв. Після установки пристрою термопари зафіксували зменшення швидкості охолодження робочого шару теплоізолізованої бочки на $\approx 23...24\%$ в порівнянні робочим шаром бочки серійного валка, в той час як раніше швидкості охолодження теплоізолізованого і серійного валків були практично однаковими.

6. Порівняння залишкових ливарних напружень сприяло зниженню залишкових ливарних напружень в бочці теплоізолізованого валка на 6,4% в порівнянні з напруженнями у валку серійного виробництва. Не зважаючи на теплоізоляцію від навколишнього середовища всієї ливарної форми

напружений стан у нижніх шийках обох валків суттєво не відрізнявся, а у верхній шийці і надливі було зафіксовано зменшення коерцитивної сили в теплоізовьованого валку. Обумовлено це теплоізоляцією дзеркала металa надливу теплоізовьованого валка від навколишнього середовища і уповільненням швидкості охолодження. Цей позитивний фактор використання гарячого посаду у подальшому потребує додаткових досліджень у зв'язку з покращенням роботи надливу.

7. В умовах серійного виробництва регульований нагрів і охолодження в термічній печі спочатку остиглого валка по режиму: нагрів до 600 °С; ізотермічна витримка протягом 10 годин; охолодження з піччю – забезпечує зменшення залишкових ливарних напружень на 10,2%, що порівнянно з величиною, отриманою в теплоізовьованому валку. В дослідних валках збільшують напруження датчики температури, що складаються з кварцової трубки з подовженим наконечником, тонкостінної трубки з нержавіючої сталі і теплоізоляційного шару азбестового шнура. Крім того, важко врахувати жорстке кріплення датчиків температури до кокілю та їх вплив на підвищення напружень.

8. Розроблені параметричні критерії (K_{400} , K_{401}) дозволяють встановити вплив теплоізоляції ливарної форми на послідовність затвердіння чавуну в нижній шийці і бочці прокатного валка.

9. Комп'ютерне моделювання, адаптоване за результатами термографування реальних валків, і розрахунків за критеріями K_{400} і K_{401} дозволяє з високим ступенем точності прогнозувати характер усадочних дефектів, що утворюються в нижній шийці.

10. Збільшення внутрішнього діаметра кокілю бочки валка сприяло зменшенню усадочної раковини в нижній шийці валка. У той же час зміна товщини кокілю бочки валка в досліджених межах не робила істотного впливу на зміну розмірів усадочної раковини в нижній шийці валка.

11. Встановлено закономірності комплексного впливу діаметрів бочки і нижніх шийок валків, розмірів і теплофізичних параметрів матеріалів комбінованої форми на послідовність затвердіння даних елементів вилівка.

12. Використання екранування форми при затвердінні валка призводить до значного зниження ймовірності виникнення усадочних раковин в нижній шийці валка, що дозволяє рекомендувати даний спосіб управління процесом затвердіння і для інших типорозмірів сортопрокатних валків.

Матеріали розділу опубліковано у [101, 107, 109, 110, 111].

РОЗДІЛ 5

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ПРОКАТНИХ ВАЛКІВ ЗІ ЗМЕНШЕНИМ РІВНЕМ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ

5.1 Розподіл хімічних елементів по перерізах частин прокатного валка

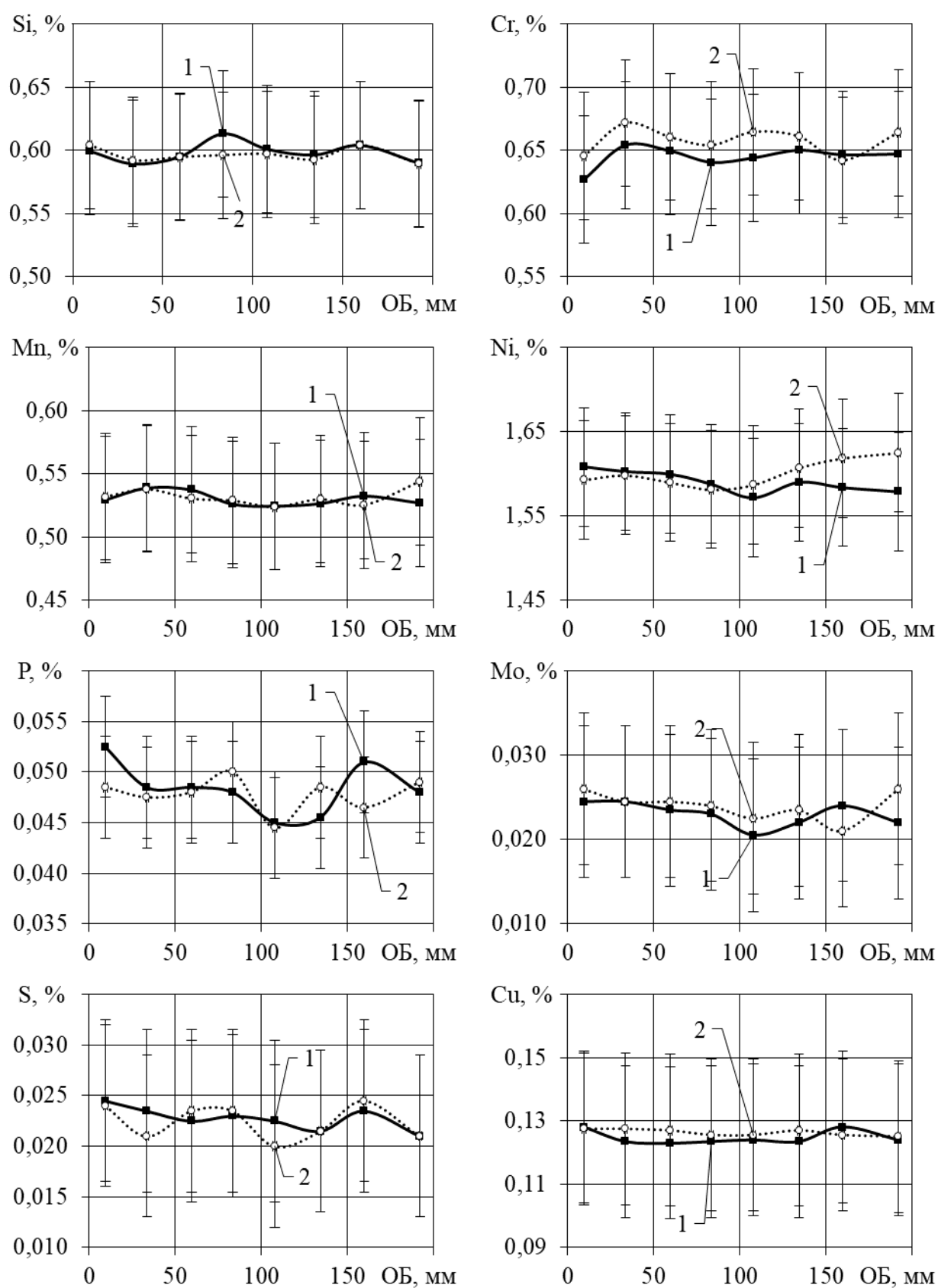
Хімічний склад серійного і теплоізолюваного валків досліджували по перетину бочок, верхньої і нижньої шийок відповідно до схем, представлених на рис. 5.1...5.3.

Встановлено, що розподіл Si, Mn, P, S, Cr, Ni, Mo, Cu по перетину бочки теплоізолюваного валка значимо не відрізнявся від серійного, що впливає з ходу залежностей (див. рис. 5.1). У шийках як теплоізолюваного, так і серійного валків скільки не будь значущих змін розподілу хімічних елементів по перетину досліджуваних також не встановлено (див. рис. 5.2 і 5.3).

Порівняльна візуальна оцінка сірчаних відбитків, представлених на рис. 5.4, не дозволила виявити будь-яких істотних відмінностей в розподілі сірки по перетину бочок і шийок серійного і теплоізолюваного валків.

5.2 Вплив регульованого охолодження на мікроструктуру прокатного валка з вибіленого чавуну

Дослідження мікроструктури матеріалу валків серійного виробництва і теплоізолюваного проводили на зразках, вирізаних з бочок і шийок відповідно до схеми (див. рис. 2.8).



1 – серійного; 2 – теплоізолюваного

Рисунок 5.1– Зміна вмісту хімічних елементів в залежності від відстані (ОБ) від поверхні бочки валка

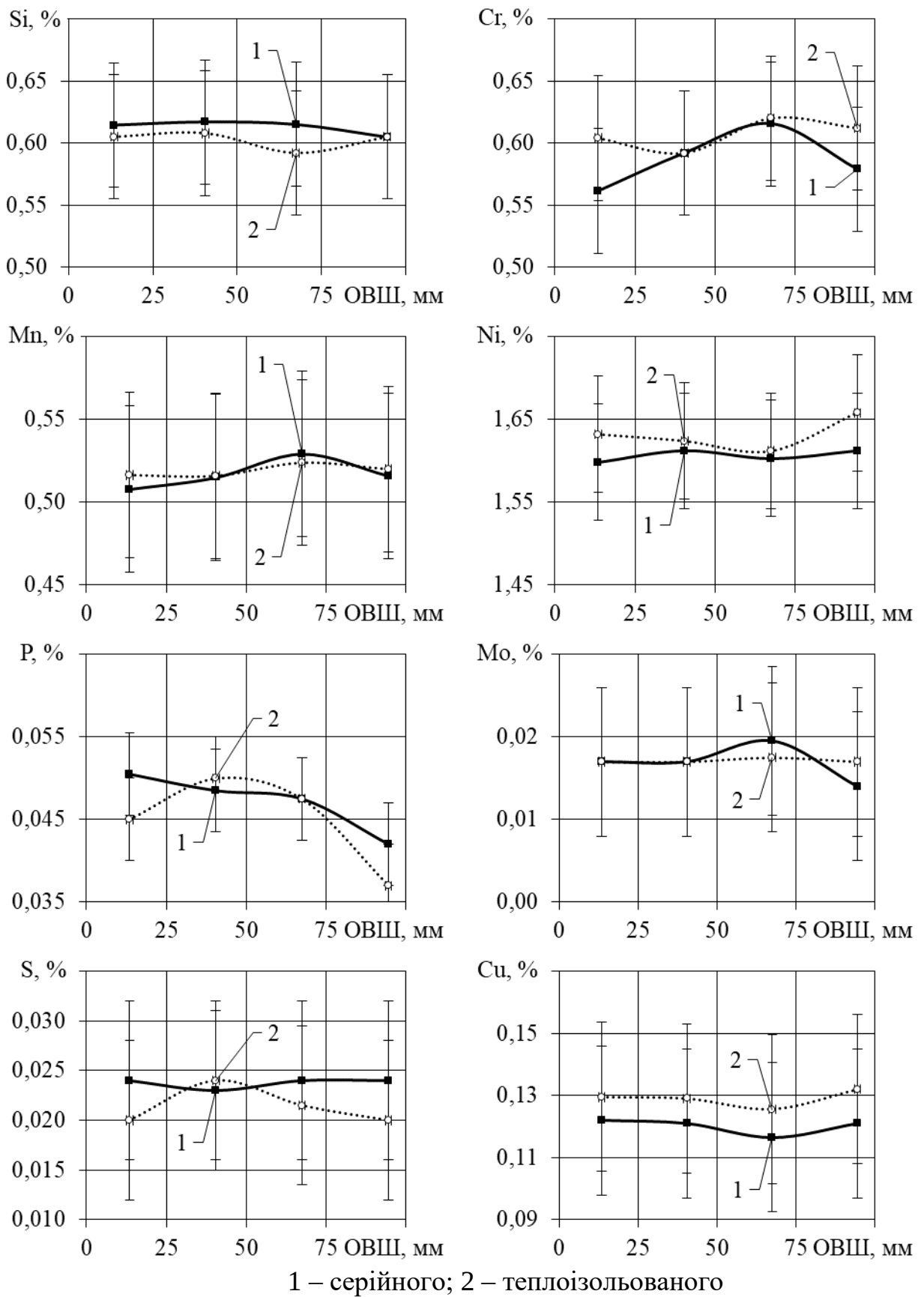


Рисунок 5.2 – Зміна вмісту хімічних елементів в залежності від відстані (ОВШ) від поверхні верхньої шийки валка

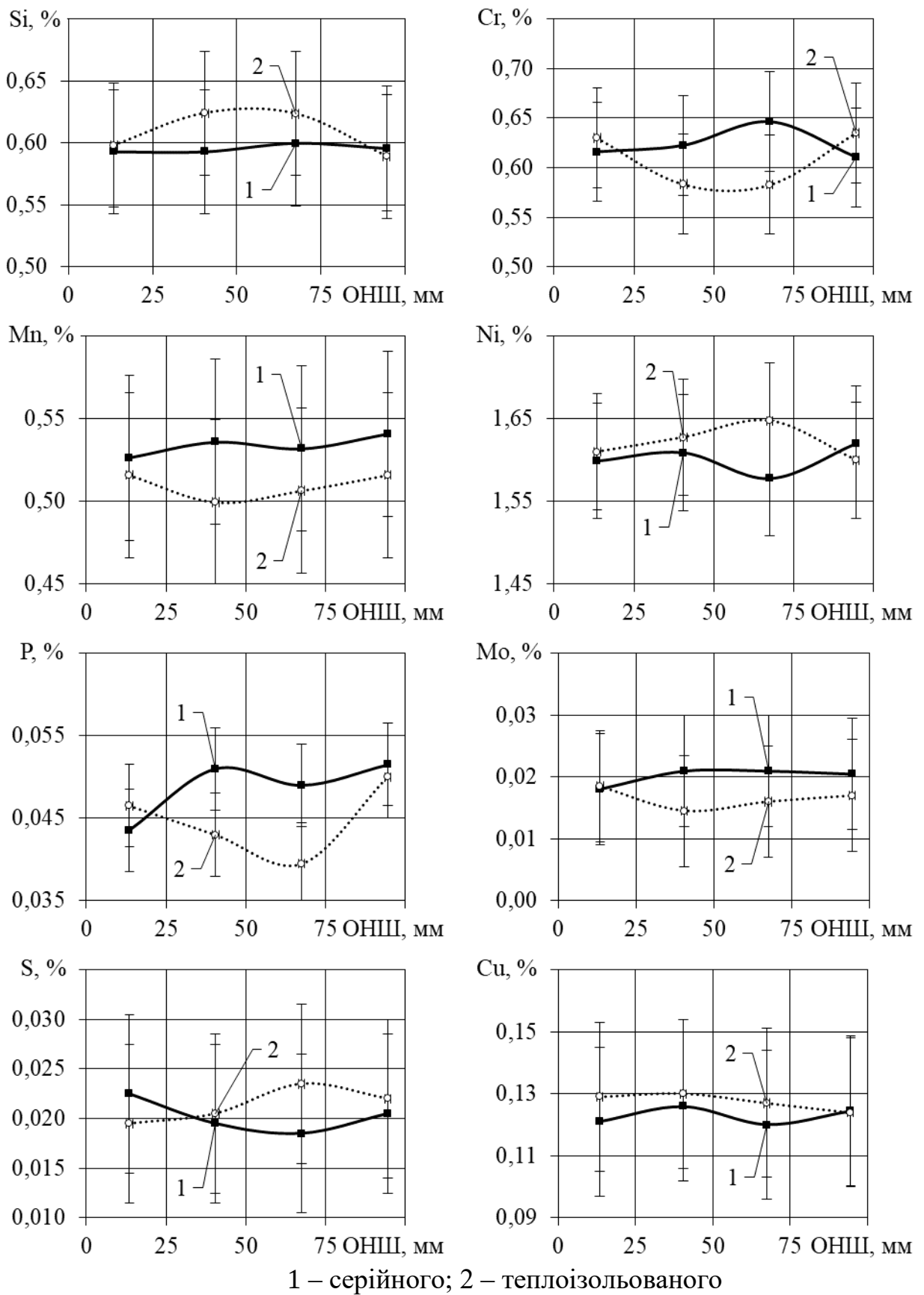
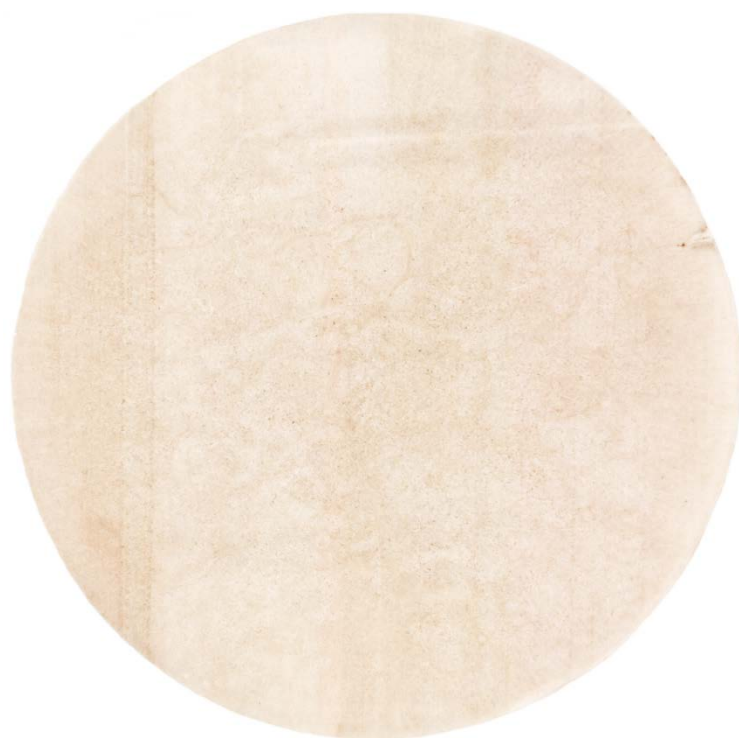


Рисунок 5.3 – Зміна вмісту хімічних елементів в залежності від відстані (ОНШ) від поверхні нижньої шийки валка



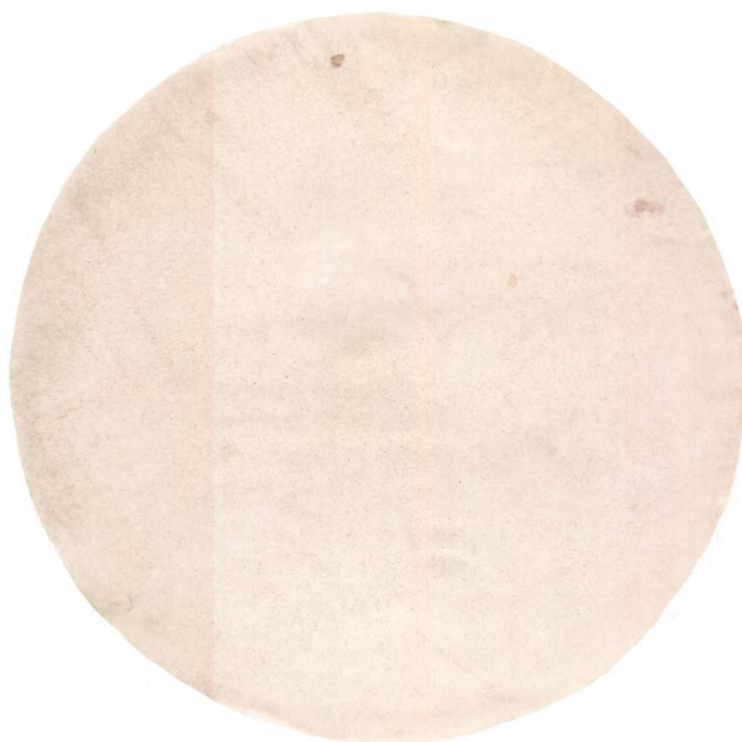
а – бочка



б – нижня шийка



в – верхня шийка



г – бочка



д – нижня шийка



е – верхня шийка

Рисунок 5.4 – Сірчані відбитки дисків від серійного (а, б, в)
і теплоізовьованого (г, д, е) валків по Бауману

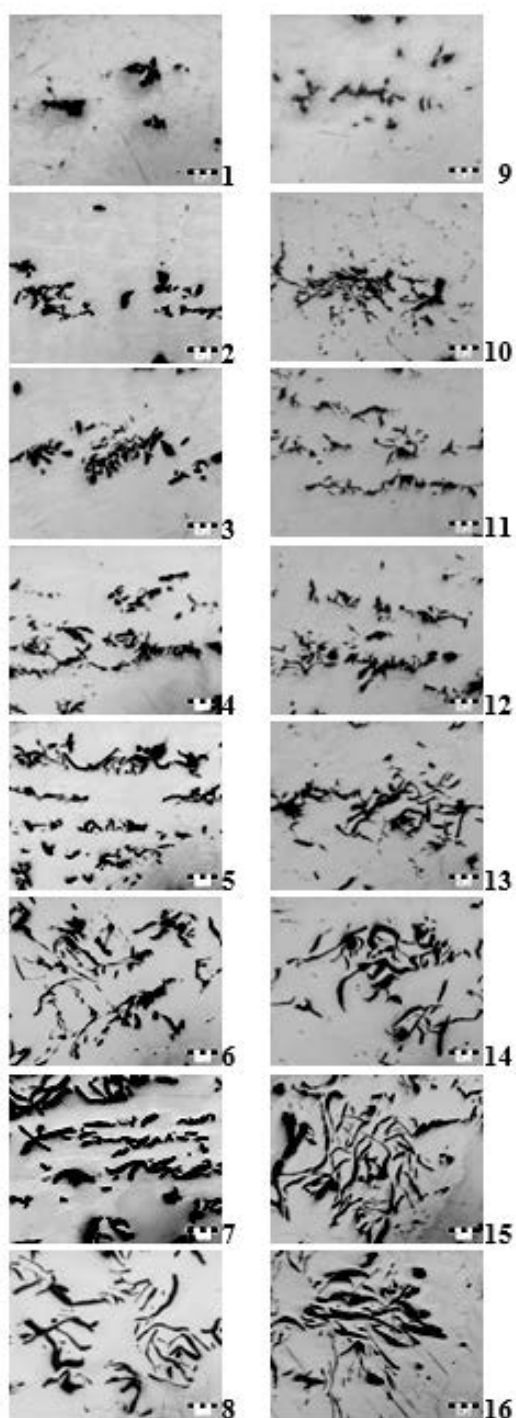
5.2.1 Мікроструктура матеріалу бочок серійного та теплоізовьованого валків

Порівняльний аналіз мікроструктури показав, що в робочому шарі серійного валка включення графіту мали пластинчасту форму, у поверхні – у вигляді невеликих розеток, які вглиб валка укрупнювалися, що впливає з аналізу мікроструктур, представлених на рис. 5.5.

Графіт можна охарактеризувати наступними балами: ПГф2–ПГд25–ПГр3–ПГ2 ГОСТ 3443-87. Кількість графітної складової з видаленням від поверхні бочки валка збільшилася від 0,4% на відстані 10 мм до 12,5% на відстані 190 мм, при цьому характеристика графіту була – ПГф2-ПГд90-ПГр3-ПГ12 балів (табл. 5.1).

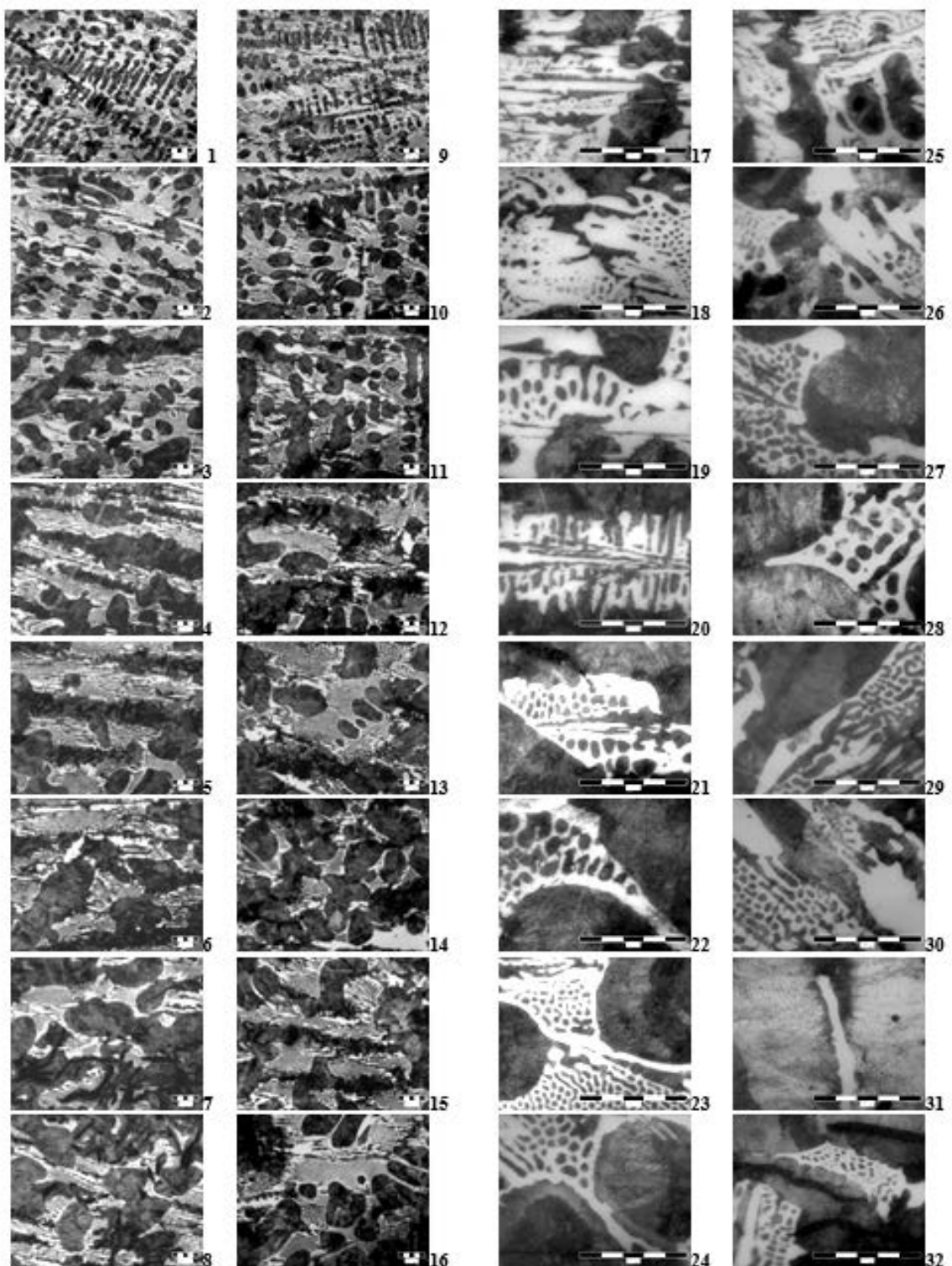
Таблиця 5.1 – Результати металографічного аналізу чавуну в бочках серійного і теплоізовьованого валків виконання СПХН-60

Валок (номери валків)	Відстань від поверхні бочки, мм	Кількість структурних складників, %			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- ізовьований (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



відстань від поверхні бочки, мм: 1, 9 – 10; 2, 10 – 35, 3, 11 – 60; 4, 12 – 85; 5, 13 – 110; 6, 14 – 135; 7, 15 – 160; 8, 16 – 190. $\times 100$, не травлено

Рисунок 5.5 – Мікроструктура бочки серійного (1–8) і теплоізовьованого (9–16) валків



відстань від поверхні бочки, мм: 1, 9, 17, 25 – 10; 2, 10, 18, 26 – 35; 3, 11, 19, 27 – 60; 4, 12, 20, 28 – 85; 5, 13, 21, 29 – 110; 6, 14, 22, 30 – 135; 7, 15, 23, 31 – 160; 8, 16, 24, 32 – 190

Рисунок 5.6 – Мікроструктура бочки серійного (1–8, $\times 100$, 17–24, $\times 400$) і теплоізолюваного (9–16, $\times 100$, 25–32, $\times 400$) валків, травлено ніталем

Включення графіту в робочому шарі теплоізовованого валка практично були відсутні (див. табл. 5.1). 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 склала ПГф2–ПГд180–ПГр3–ПГ12 балів.

Структура робочого шару валка серійного виробництва складалася з дендриту перліту і аустеніто–графітної евтектики, зустрічалися ділянки цементиту конгломератного типу. Кількість цементиту на глибині 10 мм складала 30,3%, з видаленням углиб бочки зменшувалося до 19,7%. Характеристика цементиту ледебуриту була Ц25–Цп6000 (див. рис. 5.6). У робочому шарі у фазі цементит (ледебурит) з характеристикою Ц25–Цп6000 ледебуриту було 50%, а в осьовій зоні валка площа включень цієї фази склала Цп13000 з кількістю ледебуриту 85% (таблиця. 5.2).

Таблиця 5.2 – Кількість цементиту та ледебуриту у чавуні бочок серійного та теплоізовованого валків

Відстань від поверхні бочки, мм	Серійний валок, %		Теплоізовований 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

Евтектоїдне перетворення аустеніту в структурі серійного валка проходило з утворенням перлітових структур. Кількість перліту в робочому шарі складала 69,3%, а з видаленням вглиб валка, кількість перліту зменшувалася до 67,8%. Дисперсність перліту по усій глибині бочки валка відповідала балам ПД 1,0; ПД 1,4.

Встановлено, що при твердінні робочого шару теплоізолюваного валка формувалася структура грубого конгломерату цементиту і аустеніту, який при подальшому охолодженні перетворювався на перліт. Кількість цементиту на глибині 10 мм була приблизно такою ж, як і у валка серійного виробництва. Характеристика цементиту ледебуриту була Ц15–Цп13000. Не виявлено істотних змін і у будові перліту по диференційованості, перліт відповідав балам серійного валка.

У робочому шарі серійного валка зменшення кількості цементиту та ледебуриту по глибині робочого шару було дещо меншим, в порівнянні з термоізолюваним валком: у серійному – 30,3; 28,6; 25,4; 19,7% на глибині 10, 60, 110 і 190 мм, відповідно, а в теплоізолюваному – 30,1; 26,7; 22,4; 18,5%.

Незначне зменшення кількості цементиту в робочому шарі теплоізолюваного валка (див. табл. 5.1) відповідає таким самим значенням зменшення кількості цементиту після термічної обробки валків серійного виробництва з метою зменшення залишкових напружень. Це вказує на правильність вибраних режимів уповільненого охолодження теплоізолюваного валка.

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

5.2.2 Мікроструктура матеріалу нижніх шийок серійного і теплоізолюваного валків

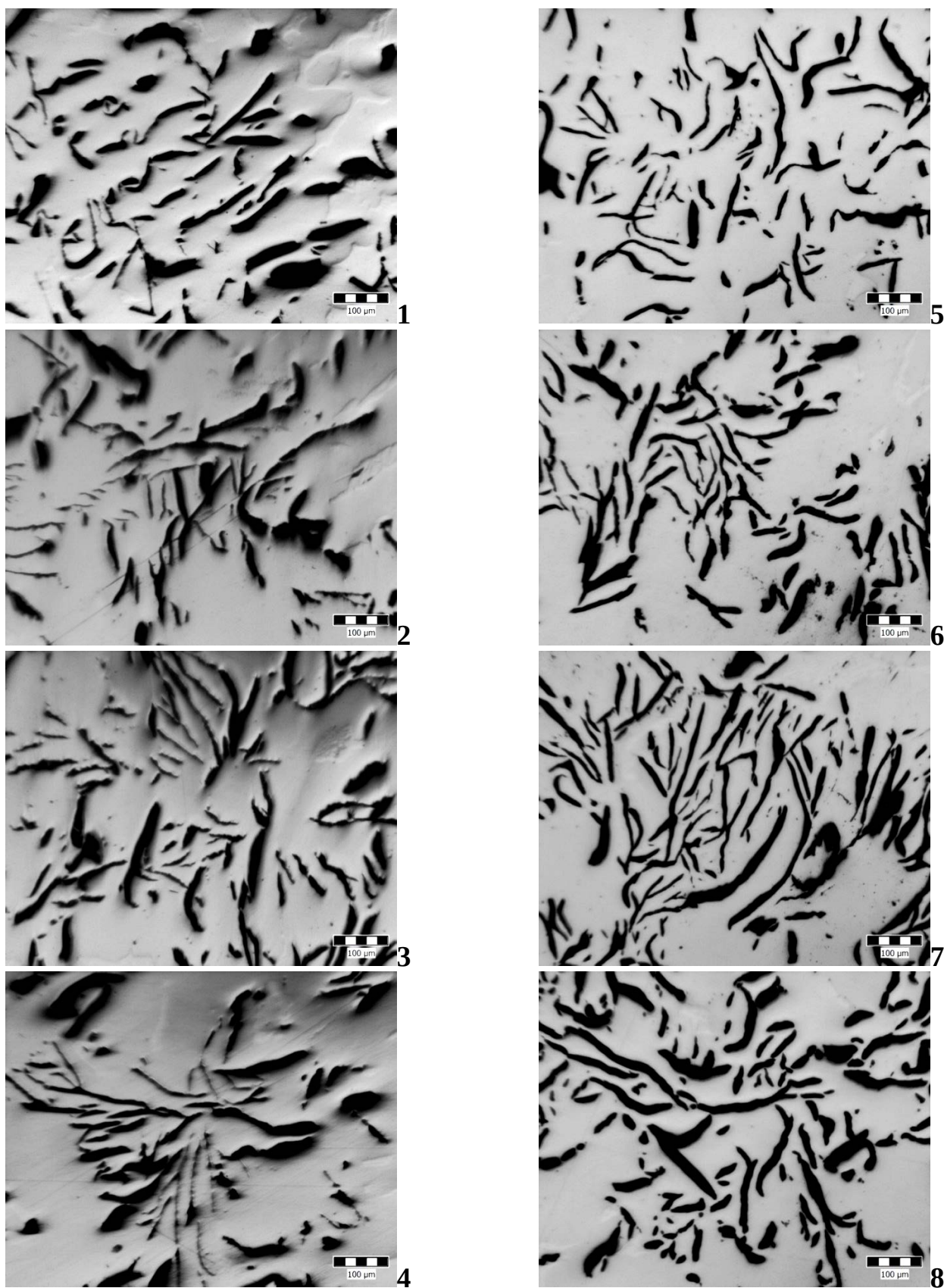
Кількість графітної складової в шийці теплоізолюваного валка збільшилася в середньому на 16,28%, а цементиту ледебуриту зменшилося на 8,62% (табл. 5.3). Дисперсність пластинчатого перліту в структурі чавуну

серійного валка характеризувалася балами ПД0,3; ПД0,5; ПД1,0; ПД1,4, а теплоізолюваного валка – ПД0,5; ПД1,0; ПД1,4.

По перерізу нижньої шийки серійного валка включення графіту мали пластинчасту форму, які углиб валка укрупнювалися (рис. 5.7). Графіт на відстані від поверхні до 14 мм можна охарактеризувати наступними балами: ПГф1–ПГд90–ПГр1–ПГ12 ГОСТ 3443–87, а на відстанях 40–95 мм балами ПГф1–ПГд180–ПГр7–ПГ12 (див. табл. 5.3). У теплоізолюваному валку графіт на відстані від поверхні до 14 мм можна охарактеризувати наступними балами: ПГф1–ПГд45–ПГр1–ПГ12, а на відстанях 40, 68, 95 мм ПГф1–ПГд90, ПГд180, ПГд350–ПГр7–ПГ12. Таким чином, довжина включень графіту в чавуні теплоізолюваного валка збільшилася (див. табл. 5.3), а інші показники характеристики включень пластинчатого графіту були такими ж, як і в чавунах серійного прокатного валка.

Таблиця 5.3 – Металографічний аналіз матеріалу нижньої шийки серійного і теплоізолюваного валків виконання СПХН–60

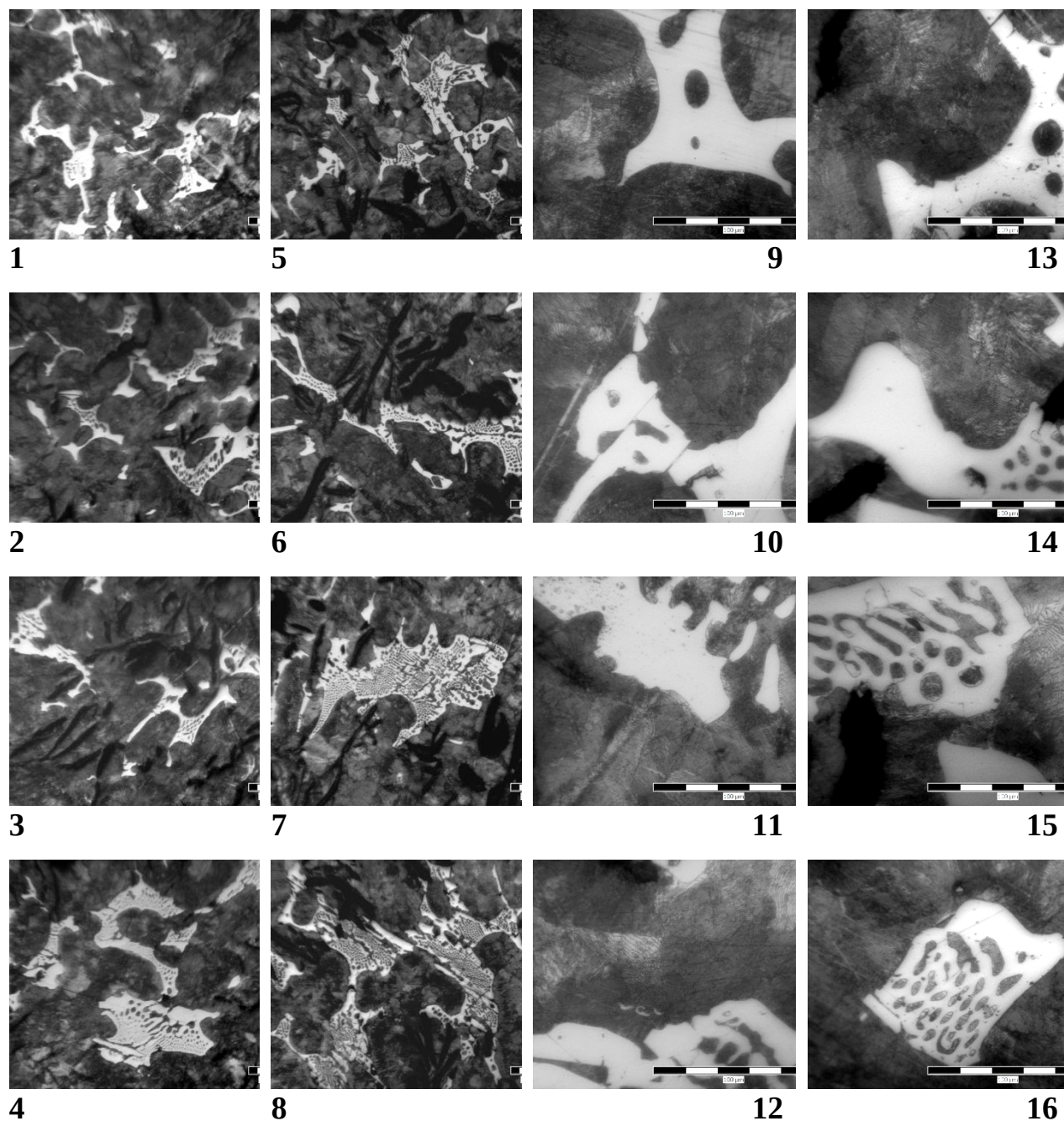
Валок	Номер валка	Відстань від поверхні шийки, мм	Кількість структурних складових, %			Дисперсність перліту	Характеристика включень графіту		
			Графіт	Цементит+ ледебурит	Перліт		Форма	Довжина	Розподіл
Серійний	8038	14	12,3	12,3	75,4	ПД0,3; ПД0,5; ПД1,0	ПГф1	ПГд90	ПГр1
		40	12,6	12,5	74,9	ПД0,3; ПД0,5; ПД1,0; ПД1,4	ПГф1	ПГд180	ПГр7
		68	12,5	14,4	73,1	ПД0,5; ПД1,0; ПД1,4	ПГф1	ПГд180	ПГр7
		95	10,5	16,5	73	ПД0,5; ПД1,0; ПД1,4	ПГф1	ПГд180	ПГр7
Теплоізолюваний	9097	14	12,2	11,3	76,5	ПД0,5; ПД1,0	ПГф1	ПГд45	ПГр1
		40	13,9	12,2	73,9	ПД1,0; ПД1,4	ПГф1	ПГд90	ПГр7
		68	14,3	12,8	72,9	ПД1,0; ПД1,4	ПГф1	ПГд180	ПГр7
		95	15,3	14,6	70,1	ПД1,0; ПД1,4	ПГф1	ПГд350	ПГр7



Відстань від поверхні, мм: 1, 5 – 14; 2, 6 – 40; 3, 7 – 68; 4, 8 – 95. x100, не травлено

Рисунок 5.7 – Мікроструктура чавуну нижньої шийки серійного (1–4) і теплоізолюваного (5–8) валків

Структура шийок досліджуваних валків була сірим перлітовим чавуном (металева основа – П(Ф0), по межах евтектичних зерен розташовувалися невеликі ділянки цементиту ледебуриту площею включень Цп20000 (рис. 5.8).



Відстань від поверхні, мм: 1, 5 – 14; 2, 6 – 40; 3, 7 – 68; 4, 8 – 95

Рисунок 5.8 – Мікроструктура чавуну нижньої шийки серійного (1–4, $\times 100$, 9–12, $\times 400$) і теплоізолюваного (5–8, $\times 100$, 13–16, $\times 400$) валків, травлено ніталем

У чавуні нижньої шийки серійного валка у фазі цементит (ледебурит) ледебуриту було в середньому 92,5% (табл. 5.4), а в теплоізовьованому – площа включень цієї фази складала Цп13000 з кількістю ледебуриту 95%.

Таблиця 5.4 – Співвідношення кількості цементиту та ледебуриту у чавунах нижніх шийок серійного та теплоізовьованого валків

Відстань від поверхні шийки, мм	Серійний валок, %		Теплоізовьований валок, %	
	Цементит	Ледебурит	Цементит	Ледебурит
14	10	90	5	95
40	10	90	5	95
68	5	95	5	95
95	5	95	5	95

5.2.3 Мікроструктура матеріалу верхніх шийок серійного і теплоізовьованого валків

Кількість графітної складової в шийці теплоізовьованого валка збільшилася в середньому на 11,28%, а цементиту ледебуриту зменшилося на 10,77% (табл. 5.5). Дисперсність пластинчатого перліту в структурі чавуну серійного валка характеризувалася балами ПД0,5; ПД1,0; ПД1,4; ПД1,6, а теплоізовьованого валка – ПД1,0; ПД1,4; ПД1,6.

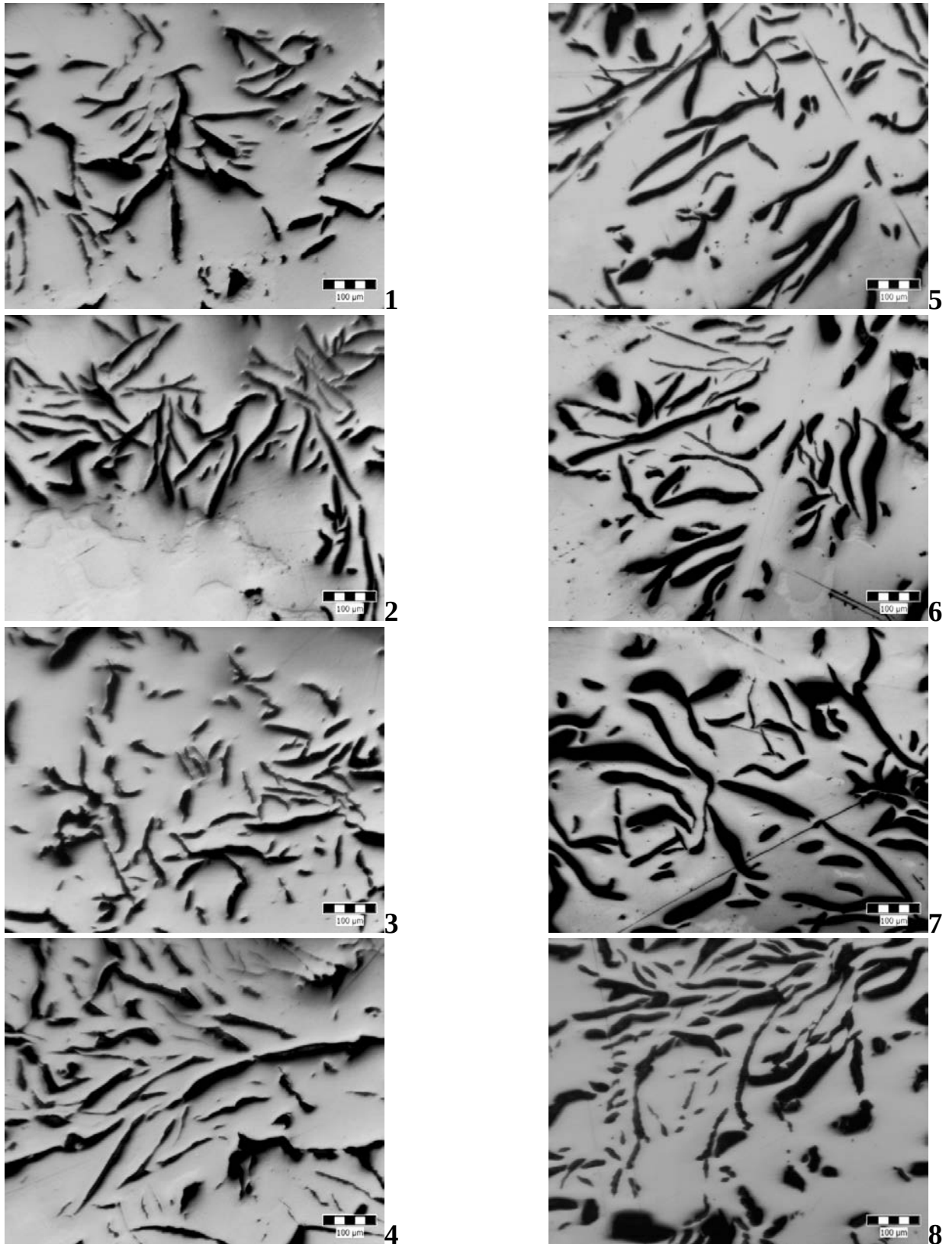
По перерізу верхньої шийки серійного валка включення графіту мали пластинчасту форму, які углиб валка укрупнювалися (рис. 5.9). Графіт по усьому перерізу шийки характеризується наступними балами: ПГф1–ПГд180–ПГр5–ПГ12 ГОСТ 3443–87, а в теплоізовьованому – ПГф2–ПГд350–ПГр5–ПГ12. Таким чином, форма включень графіту в чавуні теплоізовьованого валка була завихреною (у серійному валку –

прямолинійною), довжина включень графіту збільшилася (див. табл. 5.5), а розподіл був таким же, як і в серійному.

Таблиця 5.5 – Металографічний аналіз матеріалу верхньої шийки серійного і теплоізовольованого валків виконання СПХН–60

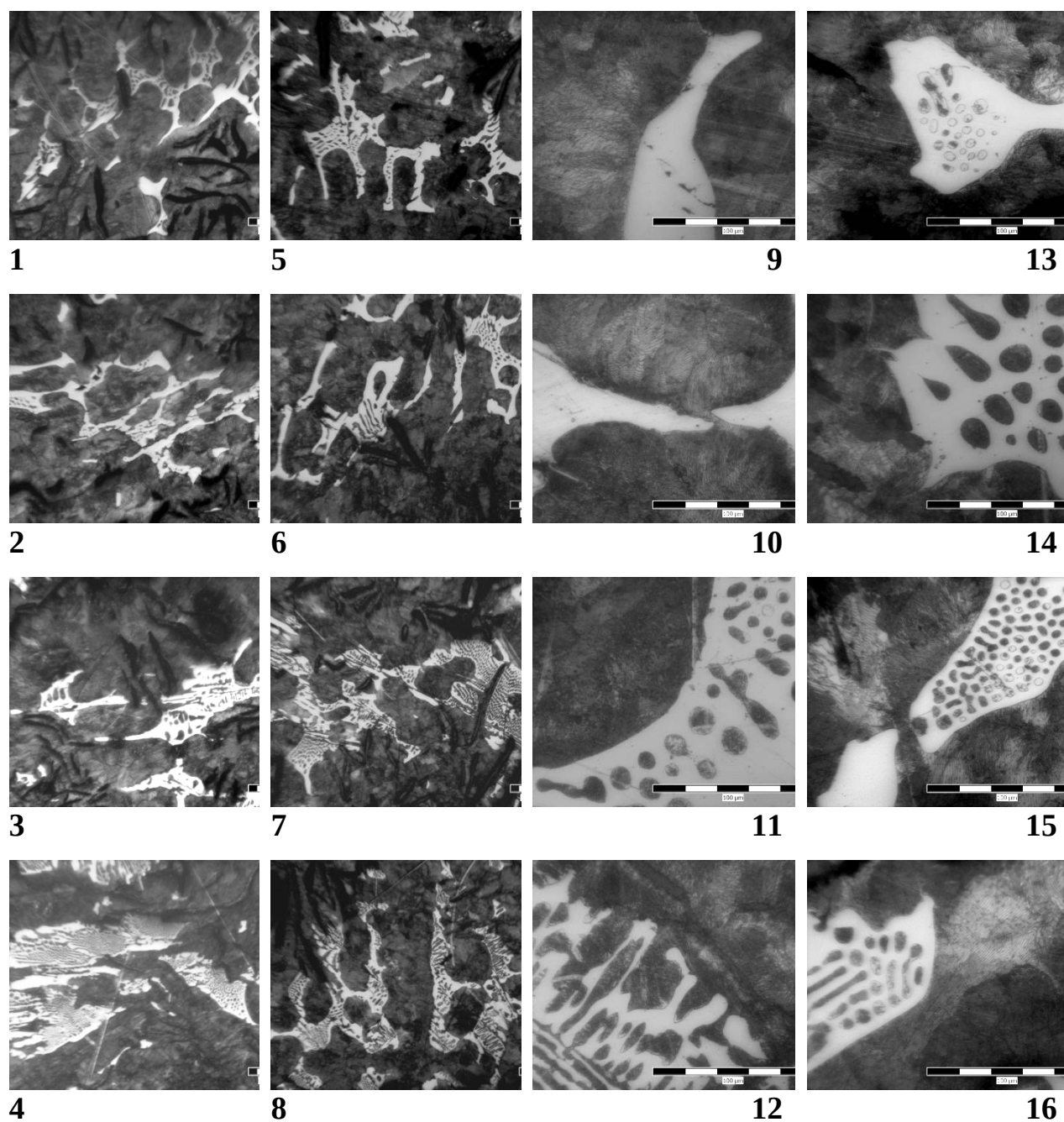
Валок	Номер валка	Відстань від поверхні шийки, мм	Кількість структурних складових, %			Дисперсність перліту	Характеристика включень графіту		
			Графіт	Цементит+ ледебурит	Перліт		Форма	Довжина	Розподіл
Серійний	8038	14	14,2	13,5	72,3	ПД0,5; ПД1,0; ПД1,4	ПГф1	ПГд180	ПГр5
		40	13,9	13,1	73	ПД0,5; ПД1,0; ПД1,4	ПГф1	ПГд180	ПГр5
		68	12,9	13,8	73,3	ПД0,5; ПД1,0; ПД1,4	ПГф1	ПГд180	ПГр5
		95	12,2	18,1	69,7	ПД0,5; ПД1,0; ПД1,4; ПД1,6	ПГф1	ПГд180	ПГр5
Теплоізовольований	9097	14	13,6	11,8	74,6	ПД1,0; ПД1,4	ПГф2	ПГд350	ПГр5
		40	14,5	12,3	73,2	ПД1,0; ПД1,4	ПГф2	ПГд350	ПГр5
		68	15,7	12,8	71,5	ПД1,0; ПД 1,4; ПД1,6	ПГф2	ПГд350	ПГр5
		95	15,4	15,3	69,3	ПД1,0; ПД 1,4; ПД1,6	ПГф2	ПГд350	ПГр5

Структура шийок досліджуваних валків була сірим перлітовим чавуном (металева основа – П(Ф0), по межах евтектичних зерен розташовувалися невеликі ділянки цементиту ледебуриду площею включень Цп20000 (рис. 5.10).



Відстань від поверхні, мм: 1, 5 – 14; 2, 6 – 40; 3, 7 – 68; 4, 8 – 95. $\times 100$, не травлено

Рисунок 5.9 – Мікроструктура чавуну верхньої шийки серійного (1–4) і теплоізовованого (5–8) валків



Відстань від поверхні, мм: 1, 5 – 14; 2, 6 – 40; 3, 7 – 68; 4, 8 – 95

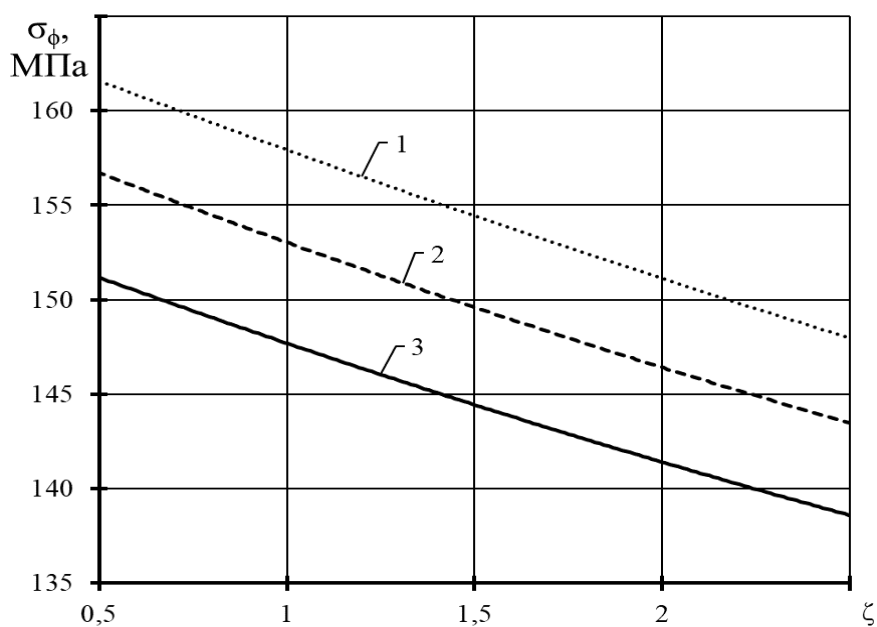
Рисунок 5.10 – Мікроструктура чавуну верхньої шийки серійного (1–4, $\times 100$, 9–12, $\times 400$) і теплоізовованого (5–8, $\times 100$, 13–16, $\times 400$) валків, травлено ніталем

У чавуні верхньої шийки серійного валка у фазі цементит (ледебурит) ледебуриту було в середньому 90% (таблиця. 5.6), а в теплоізолюваному – площа включень цієї фази склала Цп13000 з кількістю ледебуриту 93,75%.

Таблиця 5.6 – Співвідношення цементиту і ледебуриту у верхніх шийках валків серійного виробництва і теплоізолюваного

Відстань від поверхні шийки, мм	Серійний валок		Теплоізолюваний валок	
	Цементит,%	Ледебурит,%	Цементит,%	Ледебурит,%
14	20	80	10	90
40	10	90	5	95
68	5	95	5	95
95	5	95	5	95

Залежність фазових напружень у вибіленому шарі сортопрокатного валка з чавуну виконання СПХН-60 від об'ємного співвідношення ледебуриту до цементиту (ζ) в структурі представлена на рис. 5.11.



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

Рисунок 5.11 – Залежність фазових напружень в вибіленому шарі сортопрокатного валка від співвідношення вмісту ледебуриту та цементиту (ζ) в структурі шару

З аналізу залежності (рис. 5.11) випливає, що величина залишкових фазових напружень в розглянутих чавунах визначається кількістю фазових складових. При цьому зі збільшенням вмісту перліту і об'ємного співвідношення ледебуриту до цементиту в структурі вибіленого шару величина фазових напруг зменшується.

5.3 Вплив регульованого охолодження на твердість досліджуваних прокатних валків

Уповільнення інтенсивності теплообміну при твердінні валків у формі з екрануванням чинить істотний вплив не лише на формування структури, але і на їх властивості. Дослідження твердості по перерізу бочок і шийок валків представлені на рис. 5.12...5.14.

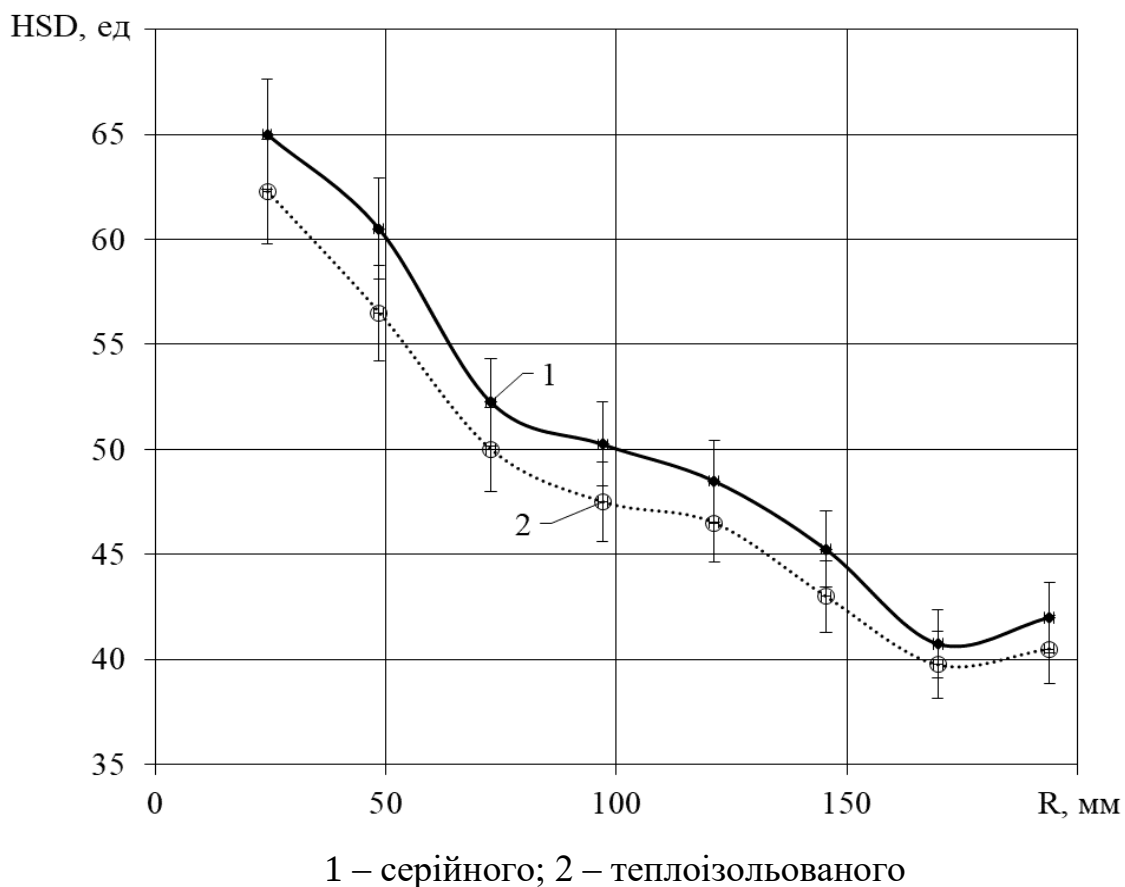


Рисунок 5.12 – Твердість у бочках валків на відстані від поверхні (R)

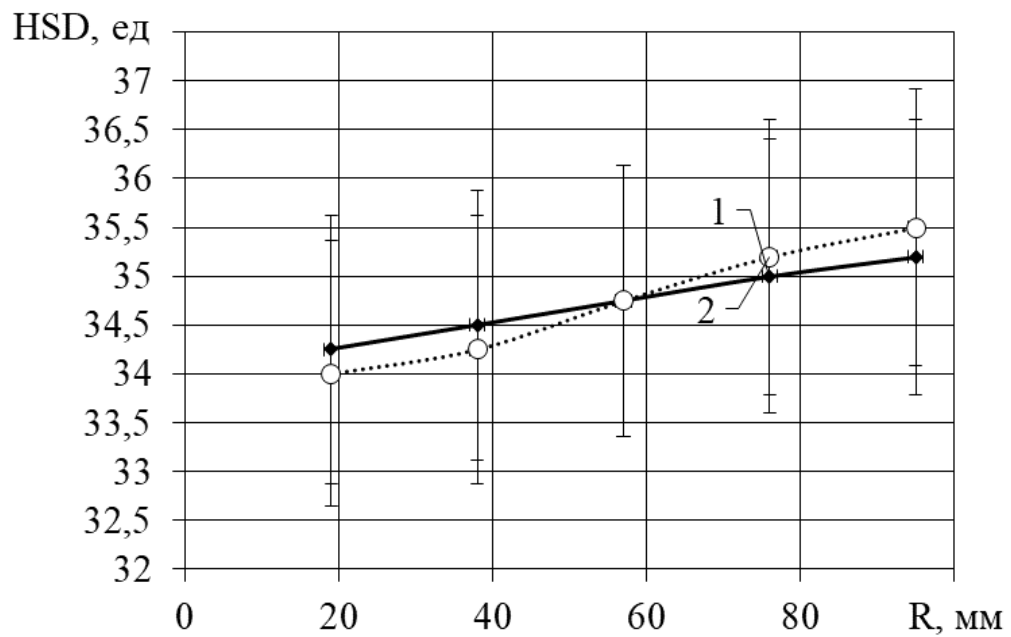


Рисунок 5.13 – Твердість в нижніх шийках валків на відстані від поверхні (R)

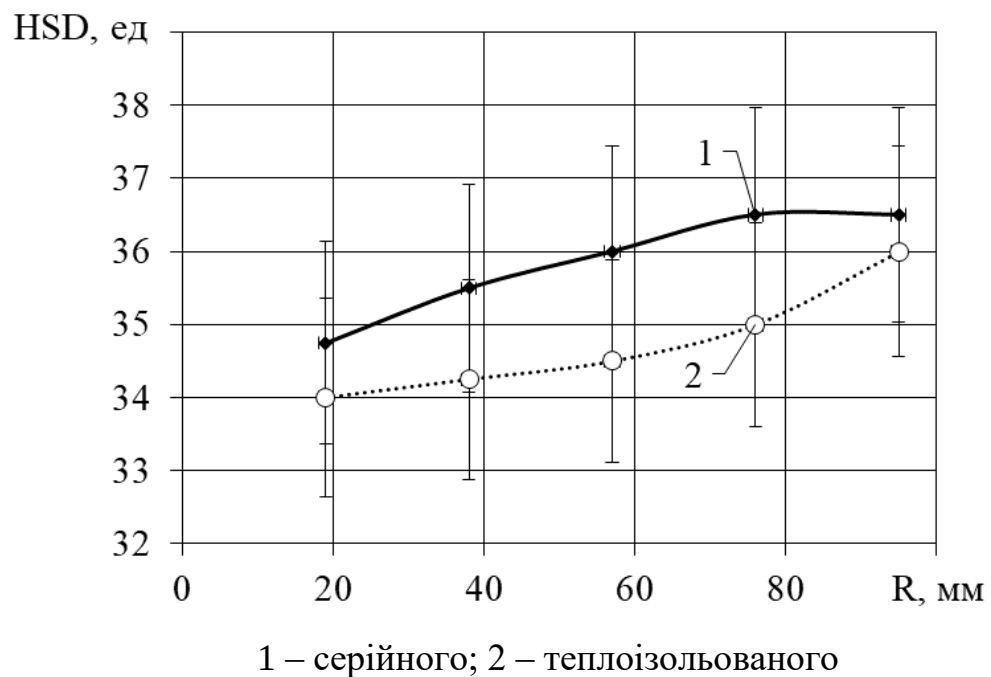
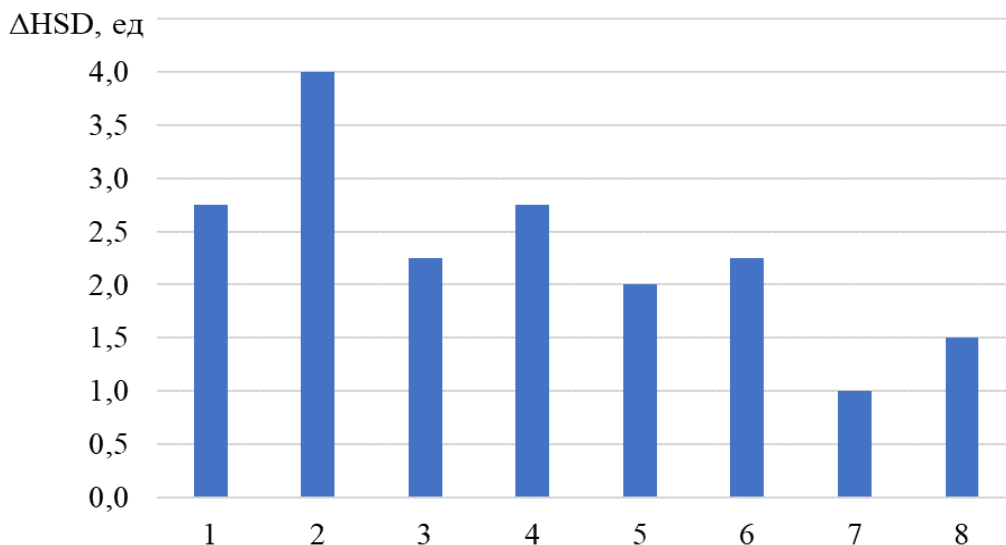


Рисунок 5.14 – Твердість у верхніх шийках валків на відстані від поверхні (R)

Зіставлення кривих зміни твердості по перерізу бочок серійного і теплоізовльованого валків показало, що екранування ливарної форми призводить до зниження твердості на 1...4 HSD (рис. 5.15).



1 – 24; 2 – 49; 3 – 73; 4 – 97; 5 – 121; 6 – 146; 7 – 170 и 8 – 194

Рисунок 5.15 – Величина зниження твердості бочки теплоізолюваного валка в порівнянні з серійним на відстані від поверхні, мм

Найбільше зниження твердості в теплоізолюваному валку отримано на відстані від поверхні бочки 49 мм, що пояснюється установкою екрану після твердіння робочого шару. В осьовій зоні валка зниження твердості було мінімальним, оскільки вплив екрану був мінімальним.

Зіставлення кривих зміни твердості по перерізу нижніх шийок серійного і теплоізолюваного валків (див. рис. 5.13) показало, що екранування форми практично не впливало на зниження твердості і інтенсивність її зміни. Мабуть, це пов'язано з нечутливістю інтенсивності твердіння нижньої шийки до зовнішнього екрану, оскільки товщина піщаної форми в області нижньої шийки перевищує радіус шийки.

Криві зміни твердості по перерізу верхніх шийок серійного і теплоізолюваного валків (див. рис. 5.14) показали, що екранування ливарної форми сприяло зниженню твердості на 0,75...1,50 HSD. Мабуть, це пов'язано з тим, що матеріал верхньої шийки після установки екрану ще знаходиться в рідкому стані та його екранування помітно зменшує інтенсивність тепловідводу з дзеркала розплаву.

5.4 Розрахунок напружень у вибіленому шарі серійного і теплоізовованого валків

Для вирішення поставленого завдання використовували формулу (1.3) контактеного напруження порожнистих циліндрів при гарячому посаді, прийнявши схему представлену на рис. 1.3.

Перетворимо рівняння (1.3), прийнявши $a=0$ і віднісши величини: I що відносяться до сірого чавуну, а II до білого чавуну. В цьому випадку величину натягу розраховуємо за формулою:

$$\Delta = \left(\frac{\alpha_c - \alpha_{\bar{o}}}{100} \right) \cdot 2c, \quad (5.1)$$

де α_c , $\alpha_{\bar{o}}$ – коефіцієнти лінійної усадки сірого і білого чавуну, відповідно, %

З урахуванням (5.1) формулу (1.3) напишемо в наступному виді:

$$p_k = \frac{\left(\frac{\alpha_c - \alpha_{\bar{o}}}{100} \right) \cdot c}{\frac{c}{E_c}(1 - \mu_c) + \frac{c}{E_{\bar{o}}} \left(\frac{b^2 + c^2}{b^2 - c^2} + \mu_{\bar{o}} \right)}, \quad (5.2)$$

або:

$$p_k = \frac{\alpha_c - \alpha_{\bar{o}}}{100 \cdot \left[\frac{1}{E_c}(1 - \mu_c) + \frac{1}{E_{\bar{o}}} \left(\frac{b^2 + c^2}{b^2 - c^2} + \mu_{\bar{o}} \right) \right]}. \quad (5.3)$$

Для проведення розрахунку набули наступних значень величин, що входять у формулу (5.3) при $b=19,5$ см, $c=14,5...17,5$ см [93]:

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

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

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

Результати розрахунки представлені у вигляді залежностей $p_k = f(\Delta_{\delta\delta}, E_c, \alpha_c)$ на рис. 5.16.

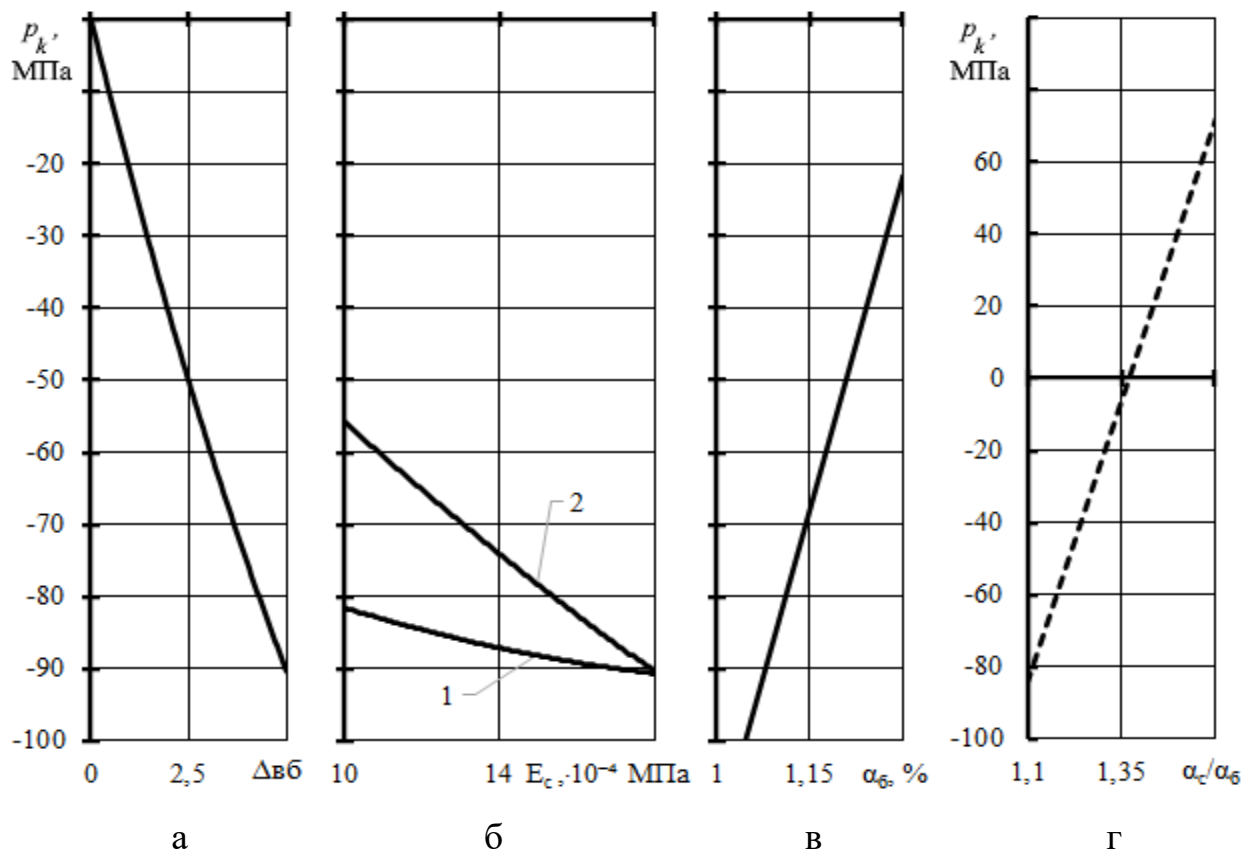


Рисунок 5.16 – Залежність величини контактного напруження від товщини вибіленого шару $\Delta_{вб}$ (а) см, модуля пружності на розтягування сірого чавуну E_c (б) при $\Delta_{вб}=4,5$ см, коефіцієнту лінійної усадки сірого чавуну α_c (в) при $\Delta_{вб}=4,5$ см, співвідношення α_c/α_{δ} при $\alpha_{\delta}=1,37\%$ (г)

Аналіз залежностей (рис. 5.16) показав, що величини контактного напруження (стискуючих) у бочці валка збільшуються з підвищенням товщини вибіленого шару і зменшенням коефіцієнта 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 ходу залежності (рис. 5.16, г) найбільш ефективним способом зміни напруженого стану робочого шару сортопрокатного валка є зміна співвідношення α_c/α_b . При цьому розтягаючі напруження в робочому шарі замінюється на стискаючі при $\alpha_c/\alpha_b < 1$.

Значення змінних для розрахунку за формулами (1.2) і (5.3) серійних і теплоізованих валків приведені в табл. 5.7 і 5.8.

Таблиця 5.7 – Значення змінних для розрахунку за формулами (1.2) і (5.3)

Валок	$\alpha_c, \%$	$\alpha_b, \%$	$E_b, \text{МПа}$	$E_c, \text{МПа}$	μ_b, μ_c
серійний	1,30	1,57	162000	110000	0,025
теплоізований	1,20	1,50	160000	110000	0,025

Таблиця 5.8 – Кількість структурних складових в серійному і теплоізованому валках

Партія валків	Відстань від поверхні бочки, мм	Кількість структурних складових, %			
		Графіт	Ледебурит	Цементит	Перліт
серійний	10	0,4	15,15	15,15	69,3
теплоізований	10	—	21,07	9,03	69,9

Значення величин фазових і усадкових напружень для серійних і теплоізованих валків, розрахованих за формулами (1.2) і (5.3), приведені в табл. 5.9.

Таблиця 5.9 – Значення величин фазових і усадкових напружень

Партія валків	Напруження, МПа				
	σ_ϕ	σ_y	$\sigma_{\phi\bar{y}}$	$\sigma_{y\bar{y}}$	Сумарні
серійний	+153,53	-83,27	–	–	+70,26
теплоізолюваний	–	–	+144,66	-91,61	+53,05

Величину коерцитивної сили $H_{c_{\bar{\sigma}}}$ у вибіленому (робочому) шарі диска, що був вирізаний з бочки валка, розраховували за формулою:

$$H_{c_{\bar{\sigma}}} = H_{c_q} + H_{c_\phi} + H_{c_y} = 6,8 \text{ А/см}, \quad (5.4)$$

де H_{c_y} – коерцитивна сила, що обумовлена усадочними напруженнями, А/см;

H_{c_ϕ} – коерцитивна сила, що обумовлена фазовими напруженнями, А/см;

H_{c_q} – коерцитивна сила не напруженого чавуну, А/см.

Після видалення з диска серцевини величину коерцитивної сили у вибіленому шарі розраховували за формулою:

$$H_{c_\kappa} = H_{c_q} + H_{c_\phi} = 9,00 \text{ А/см}, \quad (5.5)$$

Вирішуючи рівняння (5.4) і (5.5) відносно H_{c_q} знаходимо, що усадкове напруження приводить до пониження коерцитивної сили вибіленого шару на величину:

$$H_{c_y} = H_{c_{\bar{\sigma}}} - H_{c_\kappa} = 6,8 - 9,00 = -2,20 \text{ А/см}, \quad (5.6)$$

Оскільки за умовами розрахунку усадкового напруження $\sigma_y = p_k$, тоді прийнявши лінійну залежність величини коерцитивної сили від напружень у вибіленому шарі валка на 1 МПа повинне призводити до зміни коерцитивної сили на величину:

$$\Delta_{\kappa\sigma} = \frac{Hc_y}{\sigma_y} = \frac{-2,20}{-83,27} = 0,02642 \text{ A/(см} \cdot \text{МПа)}. \quad (5.7)$$

В цьому випадку, виходячи з того, що величина фазового напруження у вибіленому шарі чавуну досягає $\sigma_\phi = 170$ МПа, його поява збільшить коерцитивну силу у вибіленому шарі чавуну на величину:

$$Hc_\phi = \sigma_\phi \cdot \Delta_{\kappa\sigma} = 153,53 \cdot 0,02642 = 4,06 \text{ A/см}. \quad (5.8)$$

Отже, з рівняння (5.5) знаходимо, що

$$Hc_\kappa = Hc_\kappa - Hc_\phi = 9,00 - 4,06 = 4,94 \text{ A/см}. \quad (5.9)$$

У разі екранування формули (5.4) і (5.5) напишемо у вигляді

$$Hc_{\phi\kappa} = Hc_\kappa + Hc_{\phi\kappa} + Hc_{y\kappa} = 6,36 \text{ A/см}, \quad (5.10)$$

$$Hc_{\kappa\phi} = Hc_\kappa + Hc_{\phi\kappa} = 8,77 \text{ A/см}. \quad (5.11)$$

Оскільки Hc_κ не залежить від екранування, з формули (5.12) знаходимо

$$Hc_{\phi\kappa} = Hc_{\kappa\phi} - Hc_\kappa = 8,77 - 4,94 = 3,83 \text{ A/см}. \quad (5.12)$$

Вирішуючи (5.6) відносно $Hc_{y\varphi}$, розраховуємо

$$Hc_{y\varphi} = Hc_{\phi\varphi} - Hc_{\varphi} - Hc_{\phi\varphi} = 6,36 - 4,94 - 3,83 = -2,41 \text{ А/см.} \quad (5.13)$$

Виходячи з того, що $\Delta_{\kappa\sigma} = 0,02642 \text{ А/(см МПа)}$ розраховували величини фазових і усадкових напружень у вибіленому шарі серійного і теплоізовольованого валків. Результати розрахунків приведені в табл. 5.10.

Таблиця 5.10 – Розрахункові значення коерцитивної сили і напруження у вибіленому шарі прокатних валків СПХН–60 з розмірами бочки $\varnothing 390 \times 785 \text{ мм}$

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

Аналіз даних таблиці 5.10 показує, що використання екранування валкової ливарної форми при виробництві прокатних валків, призводить до незначного збільшення фазових (розтягуючих) і істотного підвищення усадкові (стискуючих) залишкових напружень, що по сукупності в результаті взаємної компенсації забезпечує зниження розтягуючих напружень у вибіленому шарі чавуну на 17 МПа, тобто на 24,5%.

Виходячи з отриманих даних величини коерцитивної сили не напруженого чавуну і чавуну в термообробленому валку рівень коерцитивної сили від литого стану зменшується на 0,66 А/см, тобто на 36,3%. Із зіставлення отриманих значень зменшення напружень в теплоізовольованому і термічно обробленому валках витікає, що застосування цієї технології –

екранування валкової ливарної форми, дозволяє передавати ці валки в експлуатацію без їх термічної обробки.

За результатами оцінки якості до ТУ У 28.9–00187375–106:2018 теплоізовованого валка встановлено:

- діаметр і довжина бочки – відповідає;
- діаметр і довжина шийок – відповідає;
- маса валка – відповідає;
- твердість робочого шару на контрольній глибині – відповідає;
- глибина робочого шару – відповідає;
- масова доля хімічних елементів в робочому шарі – відповідає;
- у шийках і приводних частинах валків карбідна сітка відсутня;
- на робочій поверхні бочок і шийок валків чистових клітин не допускаються раковини, тріщини, шлакові і земляні включення, що видимі неозброєним оком – відсутні.

Таким чином, випробувана технологія виготовлення сортопрокатних валків не вплинула на якість виробу і відповідає вимогам технічних умов ТУ У 28.9–00187375–106:2018. Тобто мета, поставлена в роботі, була досягнута.

5.5 Висновки

Виходячи з отриманих результатів можна констатувати, що:

1. Розроблений спосіб управління процесом формування структурою валків дозволяє, зменшити величину залишкових напружень і виключити з технології виробництва валків їх термічну обробку.

2. Порівняльна візуальна оцінка сірчаних відбитків не зафіксувала змін в розподілі сірки по перерізу бочок і шийок серійного і теплоізовованого валків.

3. Незначне зменшення кількості цементиту в робочому шарі теплоізолюваного валка відповідає таким самим значенням зменшення кількості цементиту після термічної обробки валків серійного виробництва, яку проводять у вальцеливарних цехах з метою зменшення залишкових напружень.

4. В осьовій зоні теплоізолюваного валка в порівнянні з серійним, кількість цементитної складової структури зменшилася на 9,4, а кількість графітної – збільшилася на 8,3%.

5. Екранування ливарної форми призводило до зниження твердості у бочці валка на 1...4 HSD, у верхній шийці – на 0,75...1,50 HSD. В осьовій зоні валка зниження твердості було незначним, порівняним з похибкою використовуваного контрольно-вимірювального устаткування.

6. Застосування технології екранування валкової ливарної форми дозволяє використовувати валки СПХН-60 Ø390×785 мм без їх термічної обробки.

7. Отримані дані свідчать про те, що мета, поставлена в цій роботі, була досягнута.

ЗАГАЛЬНІ 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 ($\alpha_{\text{с}}/\alpha_{\text{б}}$). Чим більше це співвідношення тим вищі додаткові залишкові напруження в робочому шарі валку. Тобто, найбільш ефективним способом зміни напруженого стану робочого шару сортопрокатного валка є зміна величини співвідношення $\alpha_{\text{с}}/\alpha_{\text{б}}$. При цьому, розтягуючі напруження в робочому шарі замінюються на стискаючі при $\alpha_{\text{с}}/\alpha_{\text{б}} < 1$.

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 діаметрами 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 діаметра 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 розливальному 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 розливальному 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 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.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Україна в 2018 году увеличила производство чугуна и сократила выплавку стали. ИНФОГРАФИКА. БизнесЦензор. 2019. URL: https://biz.censor.net.ua/news/3106916/ukraina_v_2018_godu_uvelichila_proizvodstvo_chuguna_i_sokratila_vyplavku_stali_infografika (дата звернення: 20.09.2019).
2. Хитько А. Ю. Графитизирующее модифицирование чугуновых прокатных валков в литейной форме : дис. ... канд. техн. наук : 05.16.04. Днепропетровск, 2009. 182 с.
3. Биргер И.А. Остаточные напряжения. Москва : Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1963. 232 с.
4. Павлов В.Ф., Кирпичев В.А., Вакулюк В.С. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочненных образцов с концентраторами напряжений. Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. 125 с.
5. Коцюбинский О.Ю. Коробление чугуновых отливок от остаточных напряжений. Москва: Металлургия, 1965. 174 с.
6. Соколов И.А., Уральский В.И. Остаточные напряжения и качество металлопродукции. М.: Металлургия, 1981. 96 с.
7. Головин Г.Ф. Остаточные напряжения, прочность и деформации при поверхностной закалке токами высокой частоты. Ленинград : Машиностроение, 1973. 144 с.
8. Чернышев Г.Н., Попов А.Л., Козинцев В.М., Пономарев И.И. Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах. Москва : Наука, 1996. 240 с.
9. Буркин С.П., Шимов Г.В., Андрюкова Е.А. Остаточные напряжения в металлопродукции. Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2015. 248 с.

10. Вишняков Я.Д., Пискарев В.Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах. Москва : Металлургия, 1989. 254 с.
11. Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В., Тиунов В.В. Технологические остаточные напряжения и их влияние на долговечность и надежность металлоизделий. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. 226 с.
12. Абрамов В.В. Остаточные напряжения и деформации в металлах. Расчеты методом расчленения тела. Москва : Гос. научн.-техн. изд-во машиностр. лит., 1963. 356 с.
13. Константинов Л.С, Трухов А.П. Напряжения, деформации и трещины в отливках. М.: Машиностроение, 1981. 199 с.
14. Гладких Л.И., Малыхин С.В., Пугачёв А.Т. Дифракционные методы анализа внутренних напряжений. Теория и эксперимент. Харьков НТУ "ХПИ", 2006. 304 с.
15. Власов В.Т., Дубов А.А. Физическая теория процесса деформация - разрушение. Часть I. Физические критерии предельных состояний металла. Москва: ТИССО, 2007. 517 с.
16. Нехендзи Ю. А. Стальное литье. Москва : Металлургиздат, 1948. 766 с.
17. А. с. 531646 СССР, МКИ В 22D 27/00. Способ получения отливок / А.Н. Цибрик, В.И. Мисечко, Н.Г. Черненко, М.И. Аверченков, А.А. Котовщиков, Л.И. Бутенко, В.С. Смирный. № 2106275 ; заявл. 14.02.75 ; опубл. 15.10.76, Бюл. № 38.
18. А. с. 692681 СССР, МКИ В 22D 27/00. Способ получения тонкостенных отливок из низкокремнистого чугуна / А.Н. Цибрик, В.А. Цибрик, Н.Г. Черненко, В.И. Мисечко, М.И. Аверченков. № 2516142 ; заявл. 08.08.77 ; опубл. 25.10.79, Бюл. № 39.
19. 3. 2530512 Франция, МКИ C21D 9/00. Индуктор / Schlissler J. заявл. 23.07.82 ; опубл. 27.01.84. РЖ Технология машиностроения, 1984. № 11.

20. Forschungszentrum des Werkzeugmaschinenbaues : пат. 222337 ГДР : МКИ С21D 5/00, В22D 27/00 ; заявл. 26.03.84, опубл. 15.05.85. РЖ Технология машиностроения, 1986. № 3.

21. 3. 5396921 Япония, МКИ 11 В 09. Огнеупорные блоки / Хатати Сойсакусок, заявл. 07.02.77 ; опубл. 24.08.87. РЖ Технология машиностроения. 1979. № 4.

22. А.с. 199324 ЧССР, МКИ 18с.5/00. Способ получения отливок / V. Medek. заявл. 07.03.68 ; опубл. 15.12.70, РЖ Технология машиностроения. 1972. № 6.

23. А. с. 261427 СССР, МКИ 18с 1/04, 18с 1/78. Способ снятия остаточных напряжений в деталях / А.С. Смирнов, З.Д. Черный, Ю.А. Крикун, В.А. Резвицкий, И.С. Хмара, Ю.Г. Кукса, В.Ф. Бутенко. № 1167581 ; заявл. 27.06.67 ; опубл. 11.05.70, Бюл. № 5.

24. Способ обработки деталей : пат. 2316602 Российская федерация : С21D 1/04. № 2006126186 ; заявл. 20.07.06 ; опубл. 10.02.2008, Бюл. 4.

25. Кащенко Ф.Д., Фетняева Л.А. Прокатные валки с литыми ручьями / под ред. В.П. Полухина. Москва : Металлургия, 1987. 80 с.

26. Ультразвуковой инструмент для снятия остаточных напряжений и упрочнения поверхностей металлов : пат. 2252859 Российская федерация : В 24 В 39/04. № 2004122709 ; заявл. 23.07.2004 ; опубл. 27.05.2005, Бюл. 15.

27. Realisations Ultrasoniques : пат. 1334453 Франция : С21D ; заявл. 26.06.62 ; опубл. 01.07.63. РЖ Металлургия, 1964. № 12.

28. Способ снятия растягивающих остаточных напряжений на поверхности металлических изделий : пат. 2458155 Российская федерация : С21D 7/04. № 2011115242 ; заявл. 18.04.11 ; опубл. 10.08.2012, Бюл. 22.

29. Способ повышения упругих свойств стальных витых пружин : пат. 2578859 Российская федерация : С21D 7/02. № 2014113836 ; заявл. 08.04.2014 ; опубл. 27.03.2016, Бюл. 9.

30. Способ упрочняющей термической обработки углеродистых инструментальных сталей : пат. 2557841 Российская федерация : С21D 1/04. № 2013142114 ; заявл. 13.09.2013 ; опубл. 27.07.2015, Бюл. 21.

31. Способ упрочняющей термической обработки углеродистых инструментальных сталей : пат. 2557841 Российская федерация : С21D 1/18, С21D 1/78. № 2014140009 ; заявл. 02.10.2014 ; опубл. 20.01.2016, Бюл. 2.

32. Справочник по чугуному литью : Справочник / под ред. Н.Г. Гиршовича. -3-е изд., перераб. и доп. Ленинград : Машиностроение, 1978. 758 с.

33. Способ подготовки к эксплуатации прокатных валков : пат. 2153942 Российская федерация : В 21 В 28/02. № 99121026 ; заявл. 05.10.1999 ; опубл. 10.08.2000.

34. Способ изготовления прокатных валков : пат. 2246999 Российская федерация : В 21 В 28/02. № 2003135689 ; заявл. 08.12.2003 ; опубл. 27.02.2005, Бюл. 6.

35. Геден М.В, Соболев Г.П, Паисов И.В. Термическая обработка валков холодной прокатки. Москва : Металлургия, 1973. 344 с.

36. А. с. 1518384 СССР, МКИ С 21 D 1/04. Способ снятия остаточных напряжений в протяженных металлических изделиях / Р.Ю. Бансявичюс, В.В. Волков, М.И. Долгин. № 4332329 ; заявл. 23.11.87 ; опубл. 30.10.89, Бюл. № 40.

37. Снятие остаточных напряжений : пат. 5336811 Япония : МКИ 10 А 74 ; заявл. 27.11.74, опубл. 05.10.78. РЖ Технология машиностроения, 1979. № 9.

38. А. с. 261427 СССР, МКИ 18 С 1/04, 18 С 1/78. Способ снятия остаточных напряжений в деталях / А.С. Смирнов, З.Д. Черный, Ю.А. Крикун, В.А. Резвицкий, И.С. Хмара, Ю.Г. Кукса, В.Ф. Бутенко. № 1167581 ; заявл. 27.06.67 ; опубл. 13.01.70, Бюл. № 5.

39. Способ обработки деталей : пат. 2316602 Российская федерация : С21D 1/04. № 2006126186 ; заявл. 20.07.06 ; опубл. 10.02.08, Бюл. 4.

40. А. с. 827563 СССР, МКИ С 21 D 1/30. Способ снятия внутренних напряжений в металлических изделиях / И.А. Левин, О.А. Мягков, Ю.В. Шабанов, М.К. Щеклов. Бутенко. № 2636251 ; заявл. 26.07.78 ; опубл. 07.05.81, Бюл. № 17.

41. А. с. 1786121 СССР, МКИ С 21 D 1/30. Способ снятия напряжений в изделиях / С.Г. Аппель, М.С. Аппель. № 4879392 ; заявл. 01.11.90 ; опубл. 07.01.93, Бюл. № 1.

42. Способ обработки деталей : пат. 2240356 Российская федерация : С 21 D 1/04. № 2003117258 ; заявл. 09.06.2003 ; опубл. 20.11.04.

43. А. с. 1719444 СССР, МКИ С 21 D 9/30. Способ обработки закаленных стальных изделий / Ю.И. Рагозин, И.А. Обороина, Б.А. Полянин. № 4708012 ; заявл. 21.06.89 ; опубл. 15.03.92, Бюл. № 10.

44. А. с. 1076474 СССР, МКИ С 21 D 10/00, В 23 Р 25/00. Способ снятия остаточных напряжений в деталях / В.Г. Горенко, Ю.А. Пронин, П.В. Русаков, А.А. Снежко. № 3389409 ; заявл. 25.01.82 ; опубл. 28.02.84, Бюл. № 8.

45. З. 172850 Швеция, МКИ 11 В 09. Снятие остаточных напряжений с использованием вибарции / Vibro-Verken, опубл. 27.09.60. РЖ Технология машиностроения. 1961. № 10.

46. А. с. 749911 СССР, МКИ С 21 D 1/04. Способ снятия внутренних напряжений в деталях / Я.Б. Гозман, Г.Я. Левинсон, В.М. Худяков. № 2560769 ; заявл. 15.12.77 ; опубл. 23.07.80, Бюл. № 27.

47. А. с. 1581752 СССР, МКИ С 21 D 1/04. Способ обработки металлических изделий/ С.Ф. Петров, Н.С. Дуров, Б.С. Цоликарпов. № 4414530 ; заявл. 25.04.88 ; опубл. 30.07.90, Бюл. № 28.

48. А. с. 1694659 СССР, МКИ С 21 D 1/04. Способ снятия внутренних напряжений в деталях вибрацией / Н.А. Задорожний, А.И. Дрыга, В.П. Зелик, А.И. Астапенко, Ю.Н. Рузанов, А.И. Мордвинов. № 4461913 ; заявл. 15.07.88 ; опубл. 30.11.91, Бюл. № 44.

49. Снижение остаточных напряжений от взрыва : пат. 3282743 США : 148-4 ; заявл. 22.04.64 ; опубл. 01.11.66. РЖ Металлургия, 1968. № 3.
50. Ливарні властивості металів і сплавів для прецизійного лиття: підручник для вищих учбових закладів. / В.О. Богуслаєв та ін. ; під ред. С.І. Реп'яха та В. Г. Могилатенка; 2-е вид., доп. та доопр. Запоріжжя : АТ “МОТОР СІЧ”, 2016. 474 с.
51. Практические расчеты на прочность конструктивных элементов. Ч. I. / А. Г. Дибир та ін. Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. 102 с.
52. Будагьянц Н.А., Карский В.Е. Литые прокатные валки. Москва : Металлургия, 1983. 175 с.
53. Твердження металів і металевих композицій : підручник для ВУЗів / Лейбензон В.О. та ін. Київ : Наукова думка, 2009. 447 с.
54. Дюдкин Д.А., Крупман Л.И., Максименко Д.М. Усадочные раковины в стальных слитках и заготовках. Москва: Металлургия, 1983. 136 с.
55. Воронин Ю.Ф., Камаев В.А., Матохина А.В. Выявление и ликвидация усадочных раковин и неметаллических включений. Черные сплавы. Волгоград: ВолгГТУ, 2014. 168 с.
56. Куманин И.Б. Вопросы теории литейных процессов. Формирование отливок в процессе затвердевания и охлаждения сплава. Москва : Машиностроение, 1976. 216 с.
57. Теория формирования отливки / Михайлова М.М. и др. Ростов : ДГТУ, 2009. 97 с.
58. Воронин Ю.Ф., Камаев В.А. Атлас литейных дефектов. Черные сплавы. Москва : Машиностроение-1, 2005. 330 с.
59. Разумов В.Н. Технология литейного производства. Иваново: Ивановский энергетический институт, 1974. 171 с.
60. Ключнев Н.И. Технология производства отливок из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом. Москва : Государственное

научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1962. 172 с.

61. Корольков А.М. Литейные свойства металлов и сплавов. Москва : Издательство Академии наук СССР, 1960. 196 с.

62. Лакедемонский А.В., Кваша Ф.С., Медведев Я.И. и др. Литейные дефекты и способы их устранения

63. Литейные дефекты и способы их устранения / Лакедемонский А.В. и др. Москва : Машиностроение, 1972. 152 с.

64. Фундатор В.И. Литниковые системы и заливка металлов. Москва : Машгиз, 1951. 261 с.

65. Способ и устройство для литья в форму кристаллизатор : пат. 2541267 Российская федерация : В 22 D 25/00. № 2013103880 ; заявл. 29.01.13 ; опубл. 10.02.15, Бюл. 4.

66. Стальной слиток : пат. 2368454 Российская федерация : В 22 D 7/00, В 21 В 1/02. № 2007109914 ; заявл. 19.03.07 ; опубл. 27.09.09, Бюл. 27.

67. Теплоизоляционный вкладыш для футеровки прибыльной надставки изложницы : пат. 2240204 Российская федерация : В 22 D 7/10. № 2003106900 ; заявл. 12.03.03 ; опубл. 20.11.04.

68. Обработка расплавленных металлов движущейся электрической дугой : пат. 2296034 Российская федерация : В 22 D 27/02. № 2003120795 ; заявл. 12.12.01 ; опубл. 27.03.07, Бюл. 9.

69. А. с. 1015509 СССР, МКИ Н 05 В 3/60. Погружной электронагреватель агрессивной токопроводящей среды / Л.П. Головский, В.Е. Хрычиков, В.Д. Олейник, В.П. Камкин, С.Г. Подрез. № 3376470 ; заявл. 05.01.82 ; опубл. 30.04.83, Бюл. № 16.

70. А. с. 985124 СССР, МКИ С 22 С 37/10. Чугун / О.В. Пузырьков-Уваров, Е.В. Колотило, И.Г. Ермолин, В.А. Рямов, Н.А. Будагьянц, Э.С. Церковский, И.В. Адамов, А.К. Кутафин, Н.А. Николаев, А.А. Филипенков, В.С. Губерт. № 3283175 ; заявл. 29.04.81 ; опубл. 30.12.82, Бюл. № 48.

71. А. с. 1419796 СССР, МКИ В 22 D 13/00. Способ центробежного литья биметаллических валков / А.И. Шевченко, В.Н. Кутузов, В.Г. Урчукин, Н.А. Будагьянц, В.К. Диденко, Б.М. Климковский. № 4151970 ; заявл. 27.10.86 ; опубл. 30.08.88, Бюл. № 32.

72. А. с. 740402 СССР, МКИ В 22 D 27/00, В 22 D 25/00. Устройство для отливки валков / Н.П. Котешов, В.Е. Хрычиков, А.Н. Слюсарь, Н.С. Козаченко, Ю.Е. Плющ. № 2612876 ; заявл. 13.02.78 ; опубл. 15.06.80, Бюл. № 22.

73. Анисович Г.А. Затвердевание отливок. Минск : Наука и техника, 1979. 232 с.

74. Кащенко Ф.Д., Фетняева Л.А. Прокатные валки с литыми ручьями. Москва : Металлургия, 1987. 80 с.

75. Коробейник В.В., Рудюк С.И., Вишнякова Е.Н. и др. - В кн.: Сортопрокатное производство. Харьков, 1979. С. 113-116.

76. 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.*

77. Белый А.П. Экспериментальное исследование процесса затвердевания прокатных валков с теплоизоляцией наружной поверхности бочки. *Неметалеві вкrapлення 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.*

78. . 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.*

79. Рябчиков И.В. Материалы для внепечной обработки железоуглеродистых сплавов. *Металлургия машиностроения. 2005. № 2. С. 9-17.*

80. Иванова Л.Х. Разработка технологических способов снижения напряжений в чугуновых валках и повышения их прочности : дис. ... канд. техн. наук : 05.16.04. Днепропетровск, 1984. 250 с.

81. Кутафин А.К. Исследование процесса затвердевания чугуновых отливок. *Теория и практика металлургии*. 2000. № 6 (20). С. 56-58.

82. Белай Г.Е., Дембовский В.В., Соценко О.В. Организация металлургического эксперимента: учеб. пособие. Санкт-Петербург : СЗТУ, 2010. 225 с.

83. Грачёв Ю.П., Плаксин Ю.М. Математические методы планирования эксперимента. Москва: ДеЛи принт, 2005. 296 с.

84. Кривошеев А.Е., Белай Г.Е., Соценко О.В. Основы научных исследований в литейном производстве. Киев-Донецк : Высшая школа, 1979. 168 с.

85. Монтгомери Д.К. Планирование эксперимента и анализ данных: Пер. с англ. Ленинград : Судостроение, 1980. 384 с.

86. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке / пер. с англ. под ред. Э. К. Лецкого. Москва: Мир, 1980. 610 с.

87. Репях С.И., Соценко О.В., Жегур А.А. О типичных ошибках при обработке экспериментальных данных (памятка для начинающих исследователей). *Литвеї України*. 2011. № 11. С. 18 – 30.

88. 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.

89. 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.

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

91. Лігатура для білих чавунів: пат. 114364 Україна. № 2015 10422; заявл. 26.10.2015; опубл. 25.05.2017, Бюл. № 10.
92. Лившиц Б.Г., Крапошин В.С., Липецкий Я.Л. Физические свойства металлов и сплавов. Москва : Металлургия, 1980. 320 с.
93. Чугун : Справочник / под ред. А.Д. Шермана, А.А. Жукова. Москва : Металлургия, 1991. 576 с.
94. Спосіб лиття прокатних валків з чавуну з вермикулярним графітом: пат. 111919 Україна. № 2015 04434; заявл. 06.05.2015; опубл. 24.06.2016, Бюл. № 12
95. Спосіб лиття прокатних валків з чавуну з вермикулярним графітом: пат. 113930 Україна. № 201601291; заявл. 15.02.2016; опубл. 27.03.2017, Бюл. № 6.
96. Ivanova L.Kh., Bilyu A.P., Osipenko I.A. Cast rolling rolls with reduced residual stresses. *CZEŹSTOCHOWA*. 2018. № 78. С. 14–17.
97. Іванова Л.Х., Білий О.П., Алексеєнко 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.
98. Кривошеев А.Е. Литые валки. Москва : НТИЛЧЦМ, 1957. 375 с.
99. Производство и применение прокатных валков: Справочник / Скобло Т.С. та ін. ; под ред. Т.С. Скобло. Харьков.: ЦД №1, 2013. 572 с.
100. ТУ У 28.9-00187375-106:2018. Валки чавунні та сталеві для гарячого прокатування металів. [Чинний від 2018-03-15]. Дніпро, 2018. 36 с.
101. Спосіб лиття прокатних валків: пат. 113331 Україна. № 2015 03784; заявл. 21.04.2015; опубл. 10.01.2017, Бюл. № 1
102. Диаграммы состояния двойных металлических систем : Справочник : В 3 т. / Под общ. ред. Н.П. Лякишева. М.: Машиностроение, 1996. 992 с.

103. Хричиков В.Є., Меньйло О.В. Ливарне виробництво чорних і кольорових металів: Навч. посібник. – Видання друге, доопрацьоване. - Рекомендовано Міносвіт і і науки України (лист № 1/11-5831 від 18.04.2014). Дніпропетровськ : НМетАУ, 2015. 89с.

104. Хрычиков В.Е., Руднев О.Н., Петров Г.С. и др. Влияние материала калибра кокиля на затвердевание чугунного прокатного валка. *Теория и практика металлургии*. 1999. № 4. С. 22-25.

105. Стекловолокно. Ткань конструкционного назначения. Технические условия ГОСТ 19170-2001 взамен ГОСТ 19170-70, дата введения 01.10.2002 г., 22 с.- Минск.- ИПК.- Изд. стандартов 2002.

106. ГОСТ 19170-2001 Стекловолокно. Ткань конструкционного назначения. Технические условия. [Чинний від 2002-09-30]. Москва, 2002. 16 с. (Інформація та документація).

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

108. Вейник А.И. Теория затвердевания отливок. Москва : Машгиз, 1960. 435 с.

109. 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

110. Хричиков В.Є., 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

111. Khrychikov V.E., Belyy 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)

112. Гуляев Б.Б. Литейные процессы. Москва-Ленинград : Машгиз, 1960. 416 с.
113. Рыжиков А.А., Тимофеев Г.И. Исследование свойств твердо-жидких сплавов методом моделирования. В кн. «Литейные свойства сплавов». Киев : ИПЛ АН УССР, 1973. С .5-6.
114. Рыжиков А.А., Тимофеев Г.И. Механика кристаллизующейся отливки. В кн. «Литейные свойства сплавов». Киев : ИПЛ АН УССР, 1972. С. 6-8.
115. Наривский А.В., Моисеев Ю.В., Борисов Г.П. Эффективная вязкость алюминиевых сплавов Al2 и Al9 в интервале кристаллизации. *Литейное производство*. 1976. № 6. С. 15-16.
116. 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.

Додаток А

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

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

1. Khrychikov V.E., **Belyy 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. Хричиков В.Є., **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.**, Меньяйло 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., **Bilyy A.P.**, Osipenko I.A. Cast rolling rolls with reduced residual stresses. *CZEŒTOCHOWA*. 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. **Bilyy 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., Алексеєнко 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.*

Додаток Б

АКТ ДОСЛІДНО-ПРОМИСЛОВОЇ ПЕРЕВІРКИ

"ЗАТВЕРДЖУЮ"
 Директор
 АТ "Дніпропетровський завод
 прокатних валків"
 С.А. ТОРОХТЕЙ
 "07" _____ 2007

АКТ

промислових іспитів, прийняття до розробки та наступному впровадженню результатів досліджень аспіранта Національної металургійної академії України Білого Олександра Петровича

Комісія у складі начальника вальцеливарного цеху Черного В.Л., начальника ЦЗЛ Осадчук А.Б., інженера-технолога Куркостріги І.О. і представників НМетАУ завідувача кафедри ливарного виробництва, проф. Хричикова В.Є. та Білого О.П. склали цей акт про те, що у вальцеливарному цеху було відлито на двомісному піддоні два валка $\varnothing 388 \times 785$ мм СПХН-60 (плавка №1-49). Валок № 8038 виконували за технологією ДЗПВ, а дослідний валок № 9097 – за технологією НМетАУ.

Заливання розплаву при температурі 1320°C здійснювали через загальний стояк з тангенціальним підведенням живильників в нижні шийки валків (рис. 1). Дзеркало металу надливів утеплювали шаром екзотермічної суміші, а для живлення усадки на 12 хвилині доливали розплав з температурою 1410°C . Затвердіння та охолодження дослідного валка виконували хромель-алюмелевими термопарами (рис. 2).



Рис. 1. Заливання дослідного і контрольного валків

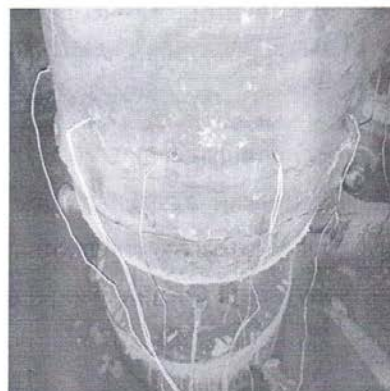


Рис. 2. Загальний вид ХА термопар для вимірювання температури твердіння бочки дослідного валка

Після затвердіння робочого шару металу дослідний валок утеплювали теплоізоляційною склотканиною, яку закріплювали на сталевому каркасі з опорами на формі надливу (рис. 3). Застосували два шари теплоізолюючої склотканини з повітряним зазором 30 мм між ними.

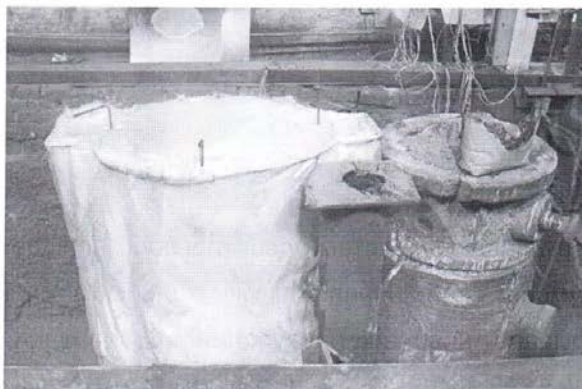


Рис. 3. Ливарні форми валків контрольного і дослідного, який утеплювали двома шарами склотканин з повітряним зазором між ними

Проведено аналіз впливу уповільненого охолодження бочки сортопрокатного валка на його структуру. В осьовій зоні дослідного валка в порівнянні з контрольним, кількість цементитної складової структури зменшилась на 9,4%, а кількість графітної - збільшилась на 8,3%. Тому властивості міцності осьової зони дослідного валка вище в порівнянні з серійним валком за рахунок зменшення в структурі цементиту і збільшення графіту.

Залишкові напруги оцінювали за допомогою магнітного структуроскопом SA51-Нс-001. Встановлено, що внутрішні напруги в дослідному валку на 6,44% менше у порівнянні з контрольним за рахунок теплоізоляції ливарної форми від навколишнього середовища.

Таким чином, вважаємо необхідним прийняти результати розробки аспіранта Білого Олександра Петровича до наступного впровадження у вальцеливарному цеху ДЗПВ.

От ПАО "ДЗПВ"

[Signature] В.Л. Чорний
[Signature] А.Б. Осадчук
[Signature] І.О. Куркостріга

От НМетАУ

[Signature] В.Є. Хричиков
[Signature] О.П. Білий

Додаток В

АКТ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ В НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЦЕС



«Затверджую»

Перший проректор НМетАУ

д.т.н., проф. В.П. Іващенко

03» лютого 2020 р.

АКТ

про впровадження в навчальний процес дисертаційної роботи на тему:
«Технологічні основи використання керованого теплообміну екрануванням
форми при виробництві чавунних прокатних валків»

Комісія в складі: начальника учбової частини В.Б. Пульпінського, декану електрометалургійного факультету д.т.н., проф. В.Ю. Селівьорстова, завідувача кафедри ливарного виробництва д.т.н., проф. В.Є. Хричикова, склали даний акт про наступне.

Результати дисертаційної роботи на тему: «Технологічні основи використання керованого теплообміну екрануванням форми при виробництві чавунних прокатних валків», що виконана старшим викладачем кафедри ливарного виробництва О.П. Білим з 1 вересня 2018 р. впроваджено в навчальний процес Національної металургійної академії України і використовуються при виконанні випускних кваліфікаційних робіт бакалаврів та магістрів.

Начальник учбової частини

В.Б. Пульпінський

Декан електрометалургійного
факультету, д.т.н., проф.

В.Ю. Селівьорстов

Завідувач кафедри ливарного
виробництва, д.т.н., проф.

В.Є. Хричиков