МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КАЛАШНІКОВА АЛІНА ЮРІЇВНА

УДК 621.74: 669.13.018

ДИСЕРТАЦІЯ

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ОДЕРЖАННЯ ВИЛИВКІВ З МОДИФІКОВАНИХ ЗНОСОСТІЙКИХ ЧАВУНІВ ДЛЯ МЕТАЛУРГІЙНОЇ ТА ГІРНИЧОРУДНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

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.

_____ А.Ю. Калашнікова

Науковий керівник – Іванова Людмила Харитонівна, д.т.н., професор

Дніпро – 2018

АНОТАЦІЯ

Калашнікова А.Ю. **Удосконалення технологічних процесів одержання виливків з модифікованих зносостійких чавунів для металургійної та гірничорудної промисловості. –** Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.04 – «Ливарне виробництво», Національна металургійна академія України, спеціалізована вчена рада Д 08.084.02, Дніпро, 2018.

Дисертація присвячена удосконаленню технологічних процесів виготовлення виливків з білих зносостійких чавунів різного ступеня легованості, з метою забезпечення підвищених механічних та експлуатаційних властивості виливків.

Виконано аналіз сучасного стану виробництва виливків зі зносостійких чавунів. Встановлено, що яскравими представниками високо навантажених деталей гірської і металургійної промисловості, що виготовляються з зносостійких чавунів різного ступеня легованості є: подрібнювальна куля, двошаровий листопрокатний валок та корпус насосу багеру. Обрані деталі об'єднує те, що вони є швидко зношуваними деталями відповідального технологічного устаткування. Проведені лабораторні та промислові дослідження виплавки комплексно модифікованих зносостійких білих чавунів різного ступеня легованості за результатами визначення структурних змін та фізико-механічних і службових властивостей показало доцільність застосування для модифікування виливків комплексного модифікатора на основі рідкісноземельних металів. Отримані результати власних дослідницьких плавок з застосуванням для модифікування виливків комплексних модифікаторів на основі рідкоземельних металів дозволили вдосконалити та запатентувати три нових склади чавунів для виливків.

В лабораторних умовах кафедри ливарного виробництва Національної металургійної академії України (НМетАУ) експериментально встановлені та отримані математичні закономірності сумісного впливу основних чинників технологічного процесу на структуру, механічні та експлуатаційні характеристики зносостійких чавунних подрібнювальних тіл. Розробка відрізняється комплексним урахуванням впливу технологічних параметрів виробництва таких як матеріал ливарної форми, конструкція ливарної форми, час витримки виливка у формі, температура вибивання, середа охолодження, модифікування розплаву на службові властивості виливків. Отриманий вдосконалений технологічний режим лиття дав можливість виготовити виливки подрібнювальних куль з підвищеними експлуатаційними характеристиками. Розроблено, досліджено та випробувано в промислових умовах найбільш ефективну конструкцію кокілю з наявністю радіатору та досліджено процес кристалізації в ньому, що істотно зменшувало масу кокілю та його ефективну тепловідвідну здатність.

Розроблено і вперше досліджено в лабораторних умовах термочасові параметри та визначені оптимальні тимчасові рамки між твердінням основного металу, обробленого комплексним модифікатором, і початком процесу промивки двошарового прокатного валка. Розробка відрізняється застосуванням багатошарової диференційованої за температурними зонами САПР моделі. Застосування розробленого процесу комп'ютерного моделювання дозволило удосконалити технологію лиття двошарових прокатних валків в комбіновану ливарну форму методом промивки. Встановлені закономірності комплексного впливу обробки металу робочого шару валка комплексним модифікатором, що містить рідкісноземельні метали, і термічної обробки на структуроутворення і механічні властивості виливків. Розробка відрізняється застосуванням комплексного модифікатора на основі рідкоземельних металів з цілеспрямованим впливом на процес структуроутворення литих двошарових прокатних валків. Це дало можливість підвищити міцність і експлуатаційні

характеристики металу робочого шару валка при зниженні витрат легувальних елементів.

Дістало подальшого розвитку комплексне дослідження структури і міцності хромистих чавунів зі зменшеним вмістом легувальних елементів під впливом комплексного модифікування розплавів, що дало можливість одержати сплав з підвищеними міцнісними і експлуатаційними характеристиками без застосування термічної обробки та при зниженні витрат легувальних елементів. Розроблено, досліджено та випробувано в промислових умовах технологічні параметри процесу отримання виливків підвищеної міцності. В екологічному плані застосування модифікування рідкісноземельними металами за трьома вдосконаленими технологіями позитивно вплине на охорону навколишнього середовища.

Ключові слова: лиття, чавун, модифікування, рідкоземельний метал, легування, структура, властивість, виливок

SUMMARY

Kalashnikova A.Yu. Improvement of technological processes of castings obtaining from modified wear-resistant cast irons for the metallurgical and mining industries. – On the rights of manuscript.

Thesis is submitted for the scientific degree of Candidate of Technical Sciences by specialty 05.16.04 – Foundry, National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, 2018.

Thesis is submitted for the scientific degree of Candidate of Technical Sciences by specialty 05.16.04 – Foundry, National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, 2018.

Thesis is devoted to the improvement of technological processes of casting of white wear-resistant cast irons with different degree of doping to provide increased mechanical and exploitational properties of castings.

Experimentally established and obtained mathematical dependence of the joint influence of the main factors of the technological process on the structure, mechanical and exploitational characteristics of wear-resistant cast iron used for production of grinding bodies. Development is characterized by a comprehensive consideration of the influence of key technological factors of production such as: mold's material, design of the mold, maturing time of casting in the mold, temperature of the casting extraction, the cooling environment, and alloy modifica-tion on the exploitational properties of the castings. Developed rational techno-logical process of casting is provided an opportunity to produce castings with increased performance characteristics. Also developed, discovered and verified on the production more efficient design of metal mold which has cooler and has been investigated process of crystallization inside itself, which provided possibility to significantly decrease weight of metal mold and effective thermal conductivity of it.

Temporal and thermal parameters were developed and for the first time investigated under laboratory conditions, and as result defined optimal temporal parameters between the crystallization of main layer of alloy, which has been modified by the modifier contained rare-earth metals (REM), and beginning of the process of bimetallic roll flushing. The development is characterized by using of the high-layered differentiated, according the thermal zones, 3D model. Using of the created approach with computing modelling provided us with the possibility to improve existing technology of bimetallic rolls production in combined molds based on the flushing technology. Also, has been defined the influence of the working layer alloy modifying by the modifier contained REM, and complex using of the heat treatment on the structure formation and mechanical characteris-tics of the cast-iron alloy. Research is characterized by using of the modifier based on the rare-earth metals with the targeted impacting on the structure for-mation of the bimetallic rolling rolls. Such complex approach allowed us to provide improvement of strength and exploitational properties of the working layer alloy with simultaneous decrement of alloying materials consuming.

Complex structure and strength research for the of chromium cast iron alloy with lower containing of alloying elements under the influence of modifier has obtained further progressing. It provides possibility to develop cast iron alloy with higher strength and exploitational properties with simultaneous decreasing of alloying materials consuming. Also, please note that developed alloy does not require any additional heat treatment. Technological parameters of higher quality castings production were created, researched and tested under the production conditions. Considering the ecological context, using of modifier contained rare-earth metals according to the improved technological processes has positive affect.

Key words: foundry, cast iron, modification, rare earth metal, doping, structure, property, casting

Основні публікації за темою дисертації

Статті у наукових фахових виданнях

1. Іванова, Л.Х., Маймур Я.С., **Калашнікова А.Ю.**, та ін. Застосування системного підходу для підвищення службових властивостей чавунних виливків. *Системні технології* . 2011. №5 (76). С. 173-177.
2. Иванова Л.Х., Колотило Е.В., **Калашникова А.Ю.**, и др. Особенности обработки чугунов редкоземельными металлами. *Строительство, материаловедение, машиностроение*: Сб. научн. трудов. Вып. 58. Днепропетровск: ГВУЗ «ПГАСА», 2011. С. 295-298.
3. Иванова Л.Х. Колотило Є.В., **Калашникова А.Ю.**, и др. Термическая обработка чугунных прокатных валков. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*: Зб. наук. праць. 2011. № 4(25). С. 87-90.
4. Иванова Л.Х., Хитько А.Ю., Маймур Я.С., **Калашникова А.Ю**., и др. Модифицированные половинчатые и серые чугуны. *Строительство,*

материаловедение, машиностроение: Сб. научн. трудов. Вып. 64. Днепропетровск: ГВУЗ «ПГАСА», 2012. С. 319-323.

5. Иванова Л.Х., **Калашникова А.Ю.** Повышение качества чугунных отливок термической обработкой. *Проблемы высокотемпературной техники*: Сб. науч. трудов. Днепропетровск: «Пороги», 2012. С. 71-76.
6. Іванова Л.Х. Маймур Я.С., **Калашнікова А.Ю**., та ін. Легувальний комплекс для підвищення ударостійкості чавунних виливків. *Теория и практика металлургии*. 2012. №5-6. С. 116-117.
7. **Калашникова А.Ю**., Иванова Л.Х., Кравцов С.В., и др. Модифицированные износостойкие чугуны для отливок. *Теория и практика металлургии*. 2013. № 3-4 (92-93). С. 25-28.
8. Иванова Л.Х., **Калашникова А.Ю.** Влияние отпуска на структуру и свойства двухслойных прокатных валков. *Проблемы высокотемпературной техники*. Сб. научн. трудов. Днепропетровск: Пороги, 2013. С. 97-100.
9. Иванова Л.Х., **Калашникова А.Ю**., Нестерук С.В. Улучшение качества отливок из хромистого чугуна. *Теория и практика металлургии*. 2017. № 3-4 (110-111). С. 125-124.

Статті у закордонних виданнях

10. Соценко О.В., Белич А.В., Иванова Л.Х., **Калашникова А.Ю.** и др. Разработка технологии литья корпуса насоса из высокохромистого чугуна. *Литейное производство*. 2013. № 4. С. 30-32.

Патенти України на винахід

11. Чавун: пат. 97439 Україна. № 20101022; заявл. 19.08.2010; опубл. 10.02.2012; Бюл. №10. 2 с.
12. Чавун для прокатних валків: пат. 98996 Україна. № 201010187; заявл. 18.08.2010; опубл. 10.07.2012; Бюл. №13. 3 с.
13. Чавун зносостійкий: пат. № 99218 Україна. № 201106603; заявл. 26.05.2011; опубл. 25.07.2012; Бюл. №14. 4 с.

Матеріали наукових конференцій

14. **Калашнікова А.Ю**., Іванова Л.Х. Перспективний зносостійкий чавун. *Международный научный журнал Технического университета Acta Universitatis Pontica Euxinus*. Стратегия качества в промышленности и образовании: Спец. выпуск. Материалы VII междунар. конф., 3-10 июня 2011 г.: тезисы докл. Варна, Болгария, 2011. т. 1. С. 101-103.

15. **Калашнікова А.Ю.,** Іванова Л.Х. Розробка складу високоміцного чавуну з високою ударостійкістю. *Литье – 2011*: материалы VII междунар. науч.-практ. конф., 21-23 апр. 2011 г.: тезисы докл. Запорожье: Ред.отдел ЗТТП. 2011. С. 98-100.

16. **Калашникова А.Ю**., Иванова Л.Х., Хитько А.Ю. Комплекснолегированный чугун для износостойких отливок. *Литье – 2012*: материалы VIII междунар. науч. - практ. конф., 22-25 мая 2012 г.: тезисы докл. Запорожье: Ред. отдел ЗТТП. 2012. С. 120-121.

17. **Калашникова А.Ю**., Белич А.В., Иванова Л.Х. Разработка технологического процесса литья с помощью программ компьютерного инженерного анализа. *Международный научный журнал Технического университета Acta Universitatis Pontica Euxinus*. Стратегия качества в промышленности и образовании: Спец. выпуск: Материалы VIII междунар. конф., 2012 г.: тезисы докл. Варна, Болгария, 2012. т. 2. С. 74-77.

18. **Калашникова А.Ю**., Белич А.В., Иванова Л.Х. Разработка технологического процесса литья отливки «корпус насоса» из высокохромистого чугуна. *Неметалеві вкраплення і гази у ливарних сплавах*: збірник тез XIII міжнар. наук. - практ. конф. 9-12 жовт. 2012 р. Запоріжжя: ЗНТУ, 2012. С. 80-81.

19. **Калашникова А.Ю**., Иванова Л.Х., Симоненко В.В. Повышение качества двухслойных прокатных валков. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні*: матеріали VI наук. - техн. конф. 20-21 трав. 2014 р. Київ: НТУУ КПІ, 2014. С. 47-49.

20. **Kalashnikova A.**, Ivanova L. Improving of quality bilayer cast iron mill rolls. *11 міжнародний симпозіум Хорватського метал. тов-ва*: «Materijali metalurgija» SHMD‘2014 «METALURGIJA. Materials and metallurgy», 22-26 июня 2014 г.: – Summaries of lectures. Sibenik. 2014. p. 52.
21. Иванова Л.Х., **Калашникова А.Ю**., Алексеенко А.С. Литье из модифицированного чугуна. *Нові конструкційні сталі та стопи і методи їх оброблення для підвищення надійності та довговічності виробів*: зб. матеріалів XIII міжнар. наук.-техн. конф. 6-8 жовт. 2014 р. Запоріжжя: ЗНТУ, 2014. С. 110-112.
22. **Калашникова А.Ю.,** Иванова Л.Х., Алексеенко А.С. Мелющие тела из комплексномодифицированного чугуна. *Литье. Металлургия. 2015*: материалы XI междунар. науч. - практ. конф., 27-29 мая 2015 г. Запорожье: Ред. отдел ЗТТП, 2015. С. 122–123.
23. **Калашникова А.Ю.,** Витер Д.А., Иванова Л.Х. Влияние низкотемпературного отпуска на структуру и свойства материала двухслойных валков. *Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейном производстве*: материалы V междунар. науч.-техн. конф., 21-25 сент. 2015. Краматорск: ДГМА, 2015. С. 89-90.
24. Иванова Л.Х., **Калашникова А.Ю**., Юрченко Ю.О. Модифицированные хромистые чугуны. *Литье. Металлургия. 2016*: Материалы XII междунар. науч. - практ. конф., 24-26 мая 2016 г.: тезисы докл. Запорожье: Ред. отдел ЗТТП, 2016. С. 104–105.
25. Иванова Л.Х., **Калашникова А.Ю.,** Николаенко А.А. Моделирование заливки двухслойного прокатного валка. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні*. ІТММ’2017: тези доп. IX міжнар. наук. - практ. конф., Дніпро, 28-30 берез. 2017 р. Дніпро: НМетАУ, 2017. С. 36.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ …… 2

ВСТУП…… 13

РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ВИРОБНИЦТВА ЗНОСОСТІЙКИХ ЧАВУНІВ ДЛЯ ВИЛИВКІВ…… 20

1.1 Характеристика та застосування зносостійких чавунних подрібнювальних куль …… 21

1.2 Характеристика чавунних двошарових листопрокатних валків… 26

1.3 Характеристика абразивозносостійких чавунних корпусів насосів…… 32

1.3.1 Вплив хімічного складу на властивості виливків…… 43

1.3.2 Вплив теплового оброблення на якість і властивості виливків……. 49

1.4 Висновки за розділом 1…….. 54

РОЗДІЛ 2 ЗАСТОСОВНІ МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРІМЕНТАЛЬНИХ РОБІТ…… 56

2.1 Застосовувані матеріали……. 56

2.2 Умови плавки, модифікування і розливання чавунів……. 56

2.3 Метод теплового оброблення…… 60

2.4 Хімічний аналіз…….. 61

2.5 Металографічний аналіз…… 61

2.6 Визначення фізико-механічних властивостей……. 62

2.7 Визначення ударостійкості…… 62

2.8 Визначення зносостійкості…… 62

2.9 Визначення термостійкості……. 64
2.10 Планування експерименту і комп'ютерне моделювання технологічних процесів……. 64
2.11 Висновки за розділом 2…… 68

РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА І ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЛИТТЯ ВИЛИВКІВ З НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ МОДИФІКОВАНИХ ЧАВУНІВ…… 69
3.1 Способи виготовлення куль…….. 69
3.2 Моделювання промислових технологій лиття чавунних куль….. 72
3.3 Дослідження впливу модифікування на структуру дослідних литих куль…… 75
3.4 Вдосконалення хімічних складів та властивостей виливків куль……. 77
3.5 Вдосконалення технологічного процесу кокільного лиття куль…….. 86
3.6 Моделювання та оптимізація технологічного процесу виготовлення куль…… 102
3.7 Виробничі випробування вдосконаленого технологічного процесу виготовлення литих куль…….. 109
3.8 Висновки за розділом 3…….. 110

РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ЛИТТЯ ВИЛИВКІВ З СЕРЕДНЬОЛЕГОВАНИХ МОДИФІКОВАНИХ ЧАВУНІВ…… 112
4.1 Технологія виготовлення двошарового прокатного валка …… 113
4.1.1 Лиття двошарового прокатного валка……. 113
4.1.2 Визначення режиму термічного оброблення литої заготовки…… 114
4.2 Дослідження структури і властивостей матеріалу валків…….. 119

4.2.1 Структура бочок валків……. 119
4.2.2 Структура шийок валків…… 123
4.2.3 Механічні властивості…… 126
4.2.4 Термостійкість…… 129
4.3 Вдосконалення хімічного складу валкового чавуну…….. 130
4.4 Комп'ютерне моделювання технологічних параметрів
лиття двошарового валка…….. 132
4.5 Висновки за розділом 4……. 141

РОЗДІЛ 5 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ЛИТТЯ ВИЛИВКІВ З
ВИСОКОЛЕГОВАНИХ МОДИФІКОВАНИХ ЧАВУНІВ…… 143
5.1 Характеристика об'єкту дослідження…….. 143
5.2. Хімічний склад дослідних чавунів…….. 145
5.3. Мікроструктура досліджуваних високохромистих сплавів……. 148
5.4. Механічні властивості досліджуваних сплавів…….. 155
5.5. Зносостійкість дослідних сплавів…… 157
5.6. Розробка технологічного процесу одержання виливка……. 158
5.7 Висновки за розділом 5……. 163

ВИСНОВКИ……. 165
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ …… 169
ДОДАТКИ……. 186

ВСТУП

Ливарне виробництво отримало широке застосування в металургії та машинобудуванні у зв’язку з суттєвими технологічними та експлуатаційними перевагами ливарних сплавів, універсальності та економічності методів отримання конструктивно складних литих виробів, максимально наближених до конфігурації та розмірів готових деталей [1, 2].

Першочерговими задачами перед ливарним виробництвом є удосконалення та оптимізація існуючих методів виробництва деталей гірничої та металургійної промисловості, розробка та впровадження нових технологічних рішень. Метою таких заходів є економія енергоресурсів, легуючих елементів, рідкого металу, часу необхідного для розробки та впровадження оптимальних технологічних процесів виробництва, мінімізації виробничих втрат, причиною яких є ливарні дефекти, при цьому враховуючи вищенаведене, головною умовою є підвищення якісних та експлуатаційних характеристик продукції, що виробляється [3-6].

Актуальність теми. В умовах сучасної економіки особливо актуальними є впровадження технологічних рішень здатних забезпечити економію енергоресурсів, коштовних легувальних матеріалів та підвищення економічної ефективності виробництва.

Для виробництва високонавантажених деталей гірничого та металургійного обладнання широко застосовуються зносостійкі чавуни. Підвищення якості, і, як наслідок, підвищення експлуатаційних характеристик обладнання, що виробляється, є можливим, з умовою економії енергоресурсів, за рахунок використання комплексного модифікування, оптимізації хімічного складу, проведення термічної обробки литих виробів для зняття залишкових напружень, проектування та впровадження високоефективних та економічних технологічних процесів виготовлення литих виробів з застосуванням сучасних комп’ютерних інструментів.

Чисельні дослідження, що були проведені вітчизняними та іноземними вченими та дослідниками, у числі яких Бунін К.П., Таран-Жовнір Ю.М., Бобро Ю.Г., Гарбер М.Є., Ципін І.І. та інші, доводять, що модифікування білих чавунів є ефективним інструментом для підвищення їх механічних та експлуатаційних властивостей. Тим не менш на сьогодні такі дослідження щодо чавунів різного ступеня легування вивчені не повною мірою, зокрема, не досліджено вплив комплексних модифікаторів на основі рідкоземельних металів (РЗМ), швидкості твердіння та термічної обробки на структуру та властивості чавунів.

Таким чином, дослідження, спрямовані на пошук нових ефективних технологій виробництва литих виробів із чавунів різного ступеня легування з застосуванням вищенаведених методів і відсутність відповідних досліджень дає привід вважати дисертаційну роботу **актуальною**.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є розробка ефективних менш витратних технологічних рішень, комплексне застосування яких дозволяє підвищити якісні та експлуатаційні показники виливків зі зносостійких чавунів.

Для досягнення поставленої мети в роботі було необхідно вирішити наступні задачі:

– дослідити вплив матеріалу ливарної форми та модифікування комплексним модифікатором на основі РЗМ на структуру та властивості білих низьколегованих чавунів;

– дослідити вплив модифікування комплексним модифікатором на основі РЗМ та термічної обробки на структуру та властивості білих середньолегованих хромистонікелевих чавунів;

– дослідити вплив модифікування комплексним модифікатором на основі РЗМ на структуру та властивості білих високолегованих хромистих чавунів;

– оптимізувати параметри технології та конструкцію кокілю для виготовлення куль що мелють з низьколегованого чавуну;

– на підставі виробничих досліджень розробити технологічну інструкцію на виплавку високохромистого зносостійкого чавуну модифікованого комплексним модифікатором методом переплавки відходів виробництва ИЧХ28Н2 для використання у виробництві ПАТ «Марганецький рудоремонтний завод»;

– випробувати розроблені технології у виробництві виливків у промислових умовах та впровадити наукові та технологічні розробки в навчальний процес НМетАУ.

Об'єкт дослідження: технологічні процеси лиття деталей металургійного та гірничо-збагачувального обладнання: корпусів насосів багерів, прокатних валків, подрібнювальних куль з модифікованих зносостійких чавунів.

Предмет дослідження: закономірності процесів формування структури, отримання підвищених механічних і експлуатаційних властивостей в модифікованих чавунних сплавах для високонавантажених деталей, що працюють в умовах інтенсивного зносу.

Методи дослідження. При проведенні досліджень використовували сучасні стандартні методи хімічного, металографічного, фрактографічного аналізу, а також визначення фізико-механічних властивостей чавунів. В процесі обробки отриманих результатів застосовували методи математичного планування і оптимізації експерименту. Дослідження гідродинамічних процесів виконано за допомогою комп'ютерного 3D моделювання ливарних процесів з використанням пакета програм SolidWorks та LVMFlow. Розроблено методику проектування та моделювання технології заливання, промивки, кристалізації двошарових прокатних валків, що виготовлені методом промивки.

Наукова новизна отриманих результатів

1. **Вперше експериментально встановлені та отримані математичні закономірності сумісного впливу основних чинників технологічного процесу на структуру, механічні та експлуатаційні характеристики зносостійких чавунних подрібнювальних куль.**

Розробка відрізняється комплексним урахуванням впливу технологічних параметрів виробництва, таких як матеріал ливарної форми, конструкція ливарної форми, час витримки виливка у формі, температура вибивання, середа охолодження, модифікування розплаву на службові властивості виливків. Це дозволило отримати виливки з підвищеними експлуатаційними характеристиками.

2. **Вперше теоретично встановлено термочасові параметри та визначені оптимальні часові рамки між твердінням робочого шару основного металу, обробленого комплексним модифікатором, і початком процесу промивки осьової зони двошарового прокатного валка.**

Розробка відрізняється застосуванням багатошарової диференційованої за температурними зонами САПР моделі. Застосування процесу комп'ютерного моделювання, що складається з двох стадій, дозволило удосконалити технологію лиття двошарового прокатного валка в комбіновану ливарну форму методом промивки.

3. Вперше встановлені закономірності комплексного впливу обробки металу робочого шару двошарового прокатного валка комплексним модифікатором, що містить РЗМ, і термічної обробки – циклічного відпуску на структуроутворення і механічні властивості виливків.

Розробка відрізняється застосуванням комплексного модифікатора на основі рідкоземельних металів з цілеспрямованим впливом на процес структуроутворення литих двошарових прокатних валків. Це дало можливість підвищити міцність і експлуатаційні характеристики металу робочого шару валка при зниженні витрат легуючих елементів.

4. Отримали подальший розвиток знання про закономірності зміни структури і міцності хромистих чавунів зі зниженим на 11-13% вмістом легуючого елементу під впливом комплексного модифікування розплавів.

Розробка відрізняється цілеспрямованим використанням комплексного модифікатора на основі рідкоземельних металів для встановлення процесів

структуроутворення зносостійких виливків скорегованого хімічного складу. Це дало можливість здійснити управління формуванням мікроструктури сплаву з підвищеними міцнісними і експлуатаційними характеристиками без застосування термічного оброблення та при зниженні витрат легуючих елементів, порівняно з діючим технологічним процесом.

Практичне значення отриманих результатів

1. Розроблено та запропоновано технологічні процеси виготовлення чавунних виливків різного ступеня легування, які дозволяють підвищити фізико-механічні та експлуатаційні характеристики.

2. Встановлено вплив основних технологічних параметрів на процес виробництва подрібнювальних куль. Розроблено та впроваджено новий склад чавуну для таких виливків (пат. 97439 «Чавун»). Технологічний процес успішно випробувано в промислових умовах.

3. Визначено закономірності впливу комплексної обробки металу робочого шару валка обробкою розплаву комплексним модифікатором, що містить РЗМ, та термічної обробки литої заготовки на структуроутворення і механічні властивості литих двошарових прокатних валків (пат. 98996 «Чавун для прокатних валків»).

4. Визначено хімічний склад високохромистого зносостійкого чавуну шляхом зменшення вмісту хрому під впливом комплексного модифікування розплавів для підвищення міцності і експлуатаційних характеристик. Технологічний процес виробництва таких виливків успішно випробуваний в промислових умовах (акт випробувань від 05.10.2014р.).

5. Результати дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес (довідка від 16.05.2017 р.) з дисциплін «Спеціальні та особливі види лиття» та «Прогресивні технології лиття виливків із чорних та кольорових металів і сплавів».

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення дисертаційної роботи, що виносяться на захист, сформульовано автором особисто. Результати, отримані в дисертації, базуються на дослідженнях, проведених особис-

то здобувачем. Складено огляд літератури за темою роботи, зроблено основні висновки, сформульовані мета та задачі дослідження. Виконанням послідовно трьох серій експериментальних і промислових досліджень автором визначено особливості перспективних технологічних процесів виробництва виливків із комплексно модифікованих та легованих зносостійких чавунів. Автором виконано комп'ютерне моделювання трьох гідродинамічних процесів, що відбуваються під час виготовлення обраних чавунних виливків. Встановлено закономірності впливу основних технологічних параметрів на структуру та властивості виливків. Обговорення результатів досліджень, формулювання основних висновків за темою роботи виконано здобувачем спільно з науковим керівником і, частково, із співавторами публікацій.

У дисертації не використані ідеї співробітників, що сприяли виконанню роботи. Здобувач безпосередньо брав участь у розробці технології виробництва виливків із зносостійких чавунів, проведенні експериментів, аналізі та обробці експериментальних даних. Особистий внесок здобувача в роботах опублікованих в співавторстві (у порядку, наведеному у списку опублікованих робіт): розглянуто особливості застосування системного підходу для підвищення службових властивостей чавунних виливків [1, 11, 13, 19], встановлено особливості обробки рідкоземельними металами зносостійких чавунів та вплив модифікування на його властивості [2, 4, 12, 15, 21], досліджено вплив термічної обробки чавунних прокатних валків, визначено вплив термічної обробки на ліквацію легуючих елементів в валкових чавунах [3, 5, 8, 20, 23], визначено вплив модифікування на підвищення ударостійкості чавунних виливків [6, 22], визначено вплив комплексно-модифікованих сплавів на структуру та властивості валкових чавунів [7, 14], визначено вплив хімічного складу та модифікування зносостійкого чавуну на експлуатаційні властивості [9, 16, 24], за допомогою програм комп'ютерного моделювання розроблено технологічний процес виготовлення виливків «Корпус насоса» з зносостійкого модифікованого чавуну [10, 17, 18], за допомогою програм

комп'ютерного моделювання був змодельований процес двостадійної заливки двошарових валків [25].

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження за темою дисертаційної роботи виконані відповідно до Держбюджетної тематики НМетАУ: «Розробка фізико-хімічних основ створення нових високотвердих ливарних сплавів із використанням нанодисперсних матеріалів» (ДР 0110U003239) у період 2010-2012 рр. Автор була виконавцем цієї роботи.

Апробація результатів дисертації. Наукові положення та результати роботи представлені і обговорені на міжнародних конференціях: «Литво 2011», «Литво 2012», «Литво. Металургія 2013», «Литво. Металургія 2014», «Литво. Металургія 2015», «Литво. Металургія 2016» (м. Запоріжжя, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016 рр.), «Нові матеріали та технології в машинобудуванні» (м. Київ, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015 рр.), «Перспективні технології, матеріали та обладнання в ливарному виробництві» (м. Краматорськ, 2011, 2015 рр.), «Стратегия качества в промышленности и образовании» (м. Варна, Болгарія; 2011, 2012 рр.), «METALURGIJA» SHMD'2014 (м. Шибеник, Хорватія, 2014 р.), «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ІТММ'2017» (м. Дніпро, 2017 р.).

Публікації. Основні матеріали і результати дисертації опубліковані в 25 друкованих працях, в тому числі, у 9 фахових виданнях, згідно вимог МОН України, 1 - стаття у фаховому іноземному виданні, 12 - матеріали наукових конференцій, новизна технічних рішень захищена у 3 патентах України на винахід.

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку літературних джерел зі 160 найменувань, 8 додатків, викладених на 205 сторінках. Робота містить 68 рисунків і 29 таблиць.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ВИРОБНИЦТВА ЗНОСОСТІЙКИХ ЧАВУНІВ ДЛЯ ВИЛИВКІВ

Деталі гірської і металургійної промисловості в процесі експлуатації схильні до високих навантажень, з причини чого до їх якості пред'являються високі вимоги. Підвищення експлуатаційних характеристик вироблюваного устаткування може бути здійснене за рахунок підвищення якісних показників литих деталей.

У вирішенні цих питань високоефективним є модифікування чавунних сплавів, термічне оброблення з метою зняття залишкової напруги, проектування і моделювання високоефективних і економічних технологічних процесів виготовлення литих деталей із застосуванням сучасних комп'ютерних програм, підбирання оптимальних умов охолодження і кристалізації виливків. Ці методи довели свою ефективність, тому великим резервом в рішенні поставлених завдань є комплексне застосування цих технологічних рішень з метою удосконалення технологічних процесів одержання виливків.

Слід зазначити, що зношування - це, передусім, процес взаємодії поверхонь, який супроводжується не лише їх мікрорізанням , деформацією і нагріванням, але також і зміною механічних властивостей, структури, фазового складу і хімічної активності поверхневих шарів [3].

Процес тертя завжди супроводжується зносом, який поступово приводить механічну систему в стан непридатності. Збільшення терміну служби швидкозношуваних деталей різного призначення є найважливішою проблемою сучасного машинобудування та інших галузей техніки, в рішенні якої провідне значення має металургія і ливарне виробництво.

Прийнятий ряд класифікацій за видами зносу при терті, побудованих в основному на базі зовнішніх умов і ознак процесу [7-11]. Розрізняють також чотири головні форми зносу і декілька другорядних (супутніх) процесів, які часто класифікують як самостійні види зносу [12, 13]. До основних явищ і

процесів при терті і зношуванні відносяться: схоплювання, перенесення матеріалів, задирання, викрошування і відшарування [3].

Ливарні чавуни розрізняють за мікроструктурою: сірий, білий і ковкий чавуни [2, 14-16]. Найбільш зносостійкими є білі чавуни. «Перспективи білих зносостійких чавунів – розумне використання їх переваг, насамперед, за зносостійкістю, оптимізація варіантів технології виробництва та об’єктів застосування» відмічав І.І. Ципін [17].

Залежно від кількості легуючих елементів чавун класифікують - на простий, низьколегований (до 2,5% легуючих елементів), середньолегований (від 2,5 до 10% легуючих елементів) і високолегований (понад 10% легуючих елементів) [2], останні зазвичай класифікуються як жаростійкі, жароміцні, зносостійкі, корозійностійкі, магнітні, а за складом - як хромові, нікелеві, крем'янисті, алюмінієві і марганцеві. При цьому часто один і той самий легуючий елемент надає чавуну одночасно декілька спеціальних властивостей.

Характеризуючи леговані чавуни, важливо, що їх спеціальні властивості визначаються, передусім, складом і головним чином вмістом легуючих елементів, в протилежність конструкційним чавунам, властивості яких в першу чергу визначаються структурою [2].

Яскравими представниками високо навантажених деталей гірської і металургійної промисловості, що виготовляються з чавунів різного ступеня легованості є: подрібнювальна куля, двошаровий листопрокатний валок та корпус насосу багеру. Вибрані деталі об'єднує те, що вони схильні до інтенсивного зносу, є швидко зношуваними деталями відповідального технологічного устаткування і виготовлюються зі зносостійких чавунів.

1.1 Характеристика та застосування зносостійких чавунних подрібнювальних куль

Зносостійкі чавунні подрібнювальні тіла (кулі) застосовують для подрібнення породи в рудно-збагачувальних барабанних млинах.

Барабанні млини на рудних збагачувальних фабриках застосовують для мокрого подрібнення руд після операцій подрібнення. Подрібненням вважають такий процес, увесь продукт якого менше 5мм. По видах подрібнювальних тіл барабанні млини поділяють на: стрижневі, кульові і рудногалькові. Стрижневі млини використовуються на I стадії у багатостадіальних схемах подрібнення, кульові млини - на всіх стадіях подрібнення, зокрема в одностадіальній схемі подрібнення руд, а також при доподрібнення промпродуктов і концентратів. Рудногалькові млини застосовуються як на I стадії (млини самоподрібнення), так і на II стадії у багатостадіальних схемах подрібнення [18]. Млини характеризуються внутрішнім діаметром D барабану і його робочою довжиною L. З кульових млинів найчастіше застосовуються млини з розвантаженням через грати, оскільки вони мають питому продуктивність на 10 - 15% більше, ніж млини з центральним розвантаженням і менш змізерніють матеріал [19].

Однією з найважливіших умов правильної експлуатації млина - рівномірність подавання живлення по великості і кількості руди, а також своєчасне довантаження подрібнювальних тіл.

У вітчизняній практиці застосовуються наступні режими подрібнення : каскадний (перекочування подрібнювальних тіл), водоспадний (з переважним підкиданням подрібнювальних тіл) і змішаний (каскадно-водоспадний). Каскадний режим характерний для малих швидкостей обертання барабану і малих мір заповнення його подрібнювальними тілами. Подрібнюється матеріал в цьому режимі в основному стиранням з деякою часткою роздавлювання.

Водоспадний режим характерний для великих швидкостей обертання барабану і великих мір заповнення його подрібнювальними тілами. Цей режим застосовується в кульових млинах I стадії подрібнення і млинах самоподрібнення. Подрібнюється матеріал стиранням, роздавлюванням і ударом.

Змішаний режим характерний для середніх швидкостей обертання барабану і мір заповнення його подрібнювальними тілами, і застосовується в основному в млинах II і III стадій подрібнення [18].

З метою забезпечення постійності кульового завантаження, дуже важливої умови нормальної експлуатації кульових млинів, необхідно робити систематичне довантаження куль, виходячи з фактично переробленої кількості руди і середньої витрати куль. Діаметри вживаних куль і відхилення (твердість куль 300-400 НВ), що допускаються по них, представлені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Типорозміри вживаних куль на ГЗКах України і ближнього зарубіжжя

Номінальний діаметр кулі, мм	40	50	60	70	80	90	100	110-125
Припустиме відхилення, мм	3 -1	4 -2				5 -3		5

Останнім часом кулі почали виробляти на кулепрокатних станах (стани 40-80 і 80-125, позначення за інтервалом діаметрів отримуваних куль), що забезпечує продуктивніше і якісніше виготовлення куль. На разі хімічний склад сталі для виготовлення куль,% : 0,7-1,05 C; 0,17-0,37 Si; 0,25-1,65 Cr; 0,25-0,3 Ni; 0,02-0,045 S; 0,02-0,045 P; 0,2-1,2Mn.

Витрата подрібнювальних тіл за дослідними даними [18] та питома витрата куль за різної великості подрібненого продукту представлені в табл.1.2 і 1.3. Витрата сталевих куль при доподрібненні чорнових концентратів і промпродуктів складає 0,1 - 0,2 кг/т, а витрата куль з відходів виробництва або некондиційної сталі на 25 - 30% більше.

Таблиця 1.2

Витрата подрібнювальних тіл різних типів

Подрібнювальні тіла	Кулі	Стрижні	Рудна галька
Витрата подрібнювальних тіл, кг/кВт·год	0,091	0,12	(3-7)% Qвих*
* Qвих - продуктивність млина за початковим живленням			

Таблиця 1.3

Питома витрата куль за різною великістю подрібнення, кг/т [18]

Матеріал куль	Подрібнення		
	крупне (I стадія) до крупності 0,3 мм	середнє (II стадія) - до крупності 0,15 мм	тонке (III стадія) до крупності 0,074 мм
Хромиста сталь	0,5 - 1,2	0,4 - 0,6	0,3 - 0,5
Вуглецева сталь	0,7 - 1,5	0,5 - 0,7	0,4 - 0,6

Як видно з наведеного вище й аналізу робіт А.С.Донченка [18, 19], в яких широко розглянуто устаткування гірничо-збагачувальних фабрик і умови його експлуатації, наведені дані тільки про сталеві ковані і катані кулі, навіть в пізнішому і доповненому виданні. Таким чином, можна зробити висновок, що на сьогодні існують обмежені дані про застосування і експлуатаційні характеристики чавунних литих куль.

Найбільш поширеними матеріалами для виготовлення подрібнювальних тіл є середньо- або високолеговані залізовуглецеві сплави (табл. 1.4). У

Таблиця 1.4

Залізовуглецеві сплави, що застосовуються в гірничорудній промисловості, які мають високу стійкість до абразивного зносу [20]

Назва сплаву	Твердість НВ
Високохромисті мартенситні білі чавуни	461…767
Середньолеговані мартенситні білі чавуни	514…682
Перлітні білі чавуни	321…534
Мартенситні високо вуглецеві сталі	514…712
Аустенітні сталі з низьким вмістом марганцю	514…712
Високовуглецеві перлітні стали	255…444
Аустенітні марганцевисті сталі типу Гадфільд	255…444
Мартенситні середньо- та низьколеговані сталі	321…601
Низьковуглецеві сталі в стані після прокатування	137…255

джерелах [21-29] наведені хімічні склади і механічні властивості таких сплавів, як в литому, так і в термообробленому стані. До виливків, які беруть участь в подрібненні сировини в гірничорудній і цементній промисловості, пред'являються особливо високі вимоги з причини високих абразивних навантажень, і виникаючої напруги при ударі куль. Одним з шляхів підвищення зносостійкості подрібнювальних тіл є застосування нелегованого чавуну, модифікованого комплексним модифікатором, що містить рідкісноземельні метали, при литті куль в кокіль із застосуванням високопродуктивного кулеливарного устаткування.

Багатьма авторами в численних джерелах [4, 21, 23, 24, 28] розглянуті хімічні склади і властивості сплавів для подрібнювальних тіл в литому стані і після термічного оброблення по різних режимах. Доведено, що легування і модифікування є ефективними способами підвищення експлуатаційних властивостей залізовуглецевих сплавів, у тому числі чавунних литих куль [3, 30, 31].

Проте в літературі дуже мало даних про вплив модифікаторів, що містять РЗМ, на структуру і властивості литих куль з нелегованих чавунів, виготовлених методом лиття в металеву форму. Дослідження впливу модифікаторів, що містять РЗМ, на структуру і механічні властивості куль і підвищення експлуатаційних характеристик представляє науковий і практичний інтерес.

Подрібнювальні тіла (кулі, цильпебси) методом лиття отримують на карусельно-кокільних, конвеєрно-кокільних, відцентрово-кокільних машинах і методом автоматизованого або неавтоматизованого формування на плацу в роз'ємний кокіль і піщано-глинисті форми з литниково-живильною системою, що виконується з застосуванням стрижнів.

У технічній літературі обмежені дані про технологічні параметри виробництва куль на кулеливарному устаткуванні. Видається науковий і практичний інтерес розробити і аргументовано запропонувати оптимальний технологічний режим виробництва куль діаметром 80мм (найбільш поширений типорозмір кулі) і визначити залежність запропонованих режимів витримки, ви-

бивання, середовища охолодження на структуру, об'ємну твердість, ударостійкість і експлуатаційні характеристики готової продукції, виготовленої в кокільних формах. Для визначення швидкості охолодження кулі в кокільній формі представляється доцільним застосування комп'ютерного моделювання заливання і охолодження форми.

Стандартна конструкція кокілю має прямокутну форму з товщиною стінки ½ діаметру кулі. У літературі відсутні дані про інші типорозміри і конструкції кокільних форм для виробництва куль. Зменшення витрат на утримування парку металевих форм є пріоритетним завданням для оптимізації вартості виробництва в умовах високого конкурентного середовища. Таким чином, розробка легших і ефективніших, таких, що за цього ще й не поступаються за тепловідвідною здатністю, кокільних форм представляє значний практичний інтерес.

Літературний аналіз галузі показав, що кулі (подрібнювальне середовище барабанних млинів) потрібні у великому об'ємі, зниження витрати куль на тонну подрібнюваного продукту і підвищення їх якості - важливе і актуальне завдання.

З проведеного аналізу видно, що підвищення ударостійкості та механічних властивостей й, як наслідок, збільшення експлуатаційних характеристик є актуальним завданням на теперішній час, яке можливо виконати комплексом запропонованих вище заходів з удосконалення технологічного процесу одержання литих куль з нелегованого чавуну: розробкою ефективної ливарної форми, обробленням розплаву модифікаторами, що містять РЗМ, та визначенням оптимального технологічного режиму виробництва лиття кулі із застосуванням практичних експериментів і комп'ютерного моделювання.

1.2 Характеристика чавунних двошарових листопрокатних валків

Чавунний прокатний валок – це одна з найбільш складних деталей вироблюваних методом литва. Робоча поверхня валка має структуру білого чавуну

(чи половинчастого чавуну з кулястим або пластинчатим графітом), при цьому серцевина - сірого чавуну з пластинчатим або кулястим графітом. Разом з фізичними і хімічними властивостями вживаних сплавів, процеси, що протікають в період твердіння валка, є визначальний в отриманні якісних валків з високими експлуатаційними властивостями.

Залежно від структури робочого шару валки поділяються на відбілені та з невираженим відбілом або з половинчастого чавуну, серцевина ж валка це – сірий чавун. Модифікування (введення домішок) є значним фактором управління структурою чавунних виливків [31]. В реальних виробничих умовах, коли задані швидкість охолодження виливків, склад чавуну та температура розплаву, цей фактор є єдиним в руках технолога [30, 31]

Виготовити прокатний валок високої якості з високими механічними і експлуатаційними властивостями, рівномірно розподіленими по перерізу валка, лише підбором хімічного складу чавуну при існуючих технологіях виробництва двошарових валків, представляється украй скрутним [32].

Основними вимогами до таких валків є зносостійкість, міцність і термостійкість. Залежно від того, які вимоги переважають, виливки виготовляють з БЧ, ОЧ, СЧ і ВЧШГ.

Сортамент чавунних валків, що виготовляються нині, представлений сіма укрупненими типами [2]. Характеристика, склад і властивості робочого шару листопрокатних валків наведені в табл. 1.5 і 1.6.

Таблиця 1.5

Характеристика листопрокатних валків [2]

Призначення (тип)	Позначення типу	Вид	Основні розміри бочок, мм	
			Діаметр	Довжина
Листопрокатні	Л	Гладкі, масивні	400-1200	750-4000

Можна виділити наступні основні експлуатаційні проблеми і чинники, які впливають на якість прокату і вихід з робочого стану валків:

Таблиця 1.6

Структура, склад і властивості робочого шару двошарових листопрокатних валків [2]

№ п/п	Структура робочого шару	Виконання (марка)	Твердість, HSD	Глибина відбіле-ного шару	Масова частка елементів, %							
					C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
						не більше						
1	МБК	ЛПХНМд-76	76-85	12-30	3,0-3,4	1,0	1,2	0,1	0,1	1,4-1,8	4,4-4,8	0,3-0,5
2	БМК	ЛПХНд-71	70-80	12-30	2,6-3,0	0,5	1,2	0,5	0,1	0,6-1,1	3,5-4,5	(0,3-0,5)
3	ПБК	ЛПХНд-62	62-70	12-30	2,6-3,0	0,5	1,0	0,5	0,1	0,5-1,0	2,5-3,5	-

- при прокатуванні на валки циклічно впливає температура прокатуваного металу, це призводить до вигину, нерівномірного прогрівання валків і, як наслідок, прокат піддається ударним навантаженням в ньому виникають напруги в результаті дії контактного стискування валків;

- при прокатуванні відбувається прослизання валків, внаслідок чого прокатуваний метал чинить абразивну дію на робочу поверхню валків і призводить до її зносу [32].

Такий різноманітний характер взаємодії робочих і опорних валків з прокатуваною смугою обумовлює різні, частенько суперечливі вимоги до матеріалу робочого шару, серцевини і шийок валка [33].

Робочі двошарові прокатні валки для гарячого прокатування листа відливають в стаціонарних комбінованих формах та відцентровим способом лиття [1, 34-40]. Основним матеріалом для виготовлення таких валків є хромонікелевий і хромо-нікелево-молибденовий чавун.

Аналіз хімічного складу і властивостей листопрокатних робочих валків для безперервних широкосмугових станів проведений В.Т.Калініним [32] показав, що міцніші шийки мають відцентрово литі валки. Це пояснюється тим, що серцевина і шийки валків виготовляються з чавуну з кулястим графітом. Валки вітчизняного і зарубіжного виробництва, які виготовляють в стаціонарних формах, мають близькі показники властивостей. Зарубіжні виробники, на відміну від вітчизняних, виготовляють валки з вищим вмістом легуючих елементів, з обов'язковим введенням молібдену і підвищеним вмістом вуглецю. Задовільна робота валків з високовуглецевих сплавів на станах імпортного виробництва, незважаючи на високий вміст цементиту, що має низьку термічну стійкість, згідно даних роботи [41] досягається за рахунок кращих умов охолодження під час прокатування.

Нині широке поширення серед конструкційних матеріалів отримав високоміцний чавун (ВЧ). Валки з ВЧ знайшли широке застосування у багатьох прокатних станах, як серед вітчизняних підприємств, так і зарубіжних.

Аналіз тенденцій розвитку вальцеливарного виробництва показав, що основні напрями - оптимізація хімічного складу ливарних сплавів і методів їх отримання.

Відомо, що модифікування розплаву комплексними модифікаторами з вмістом рідкісноземельних металів - один з найбільш ефективних методів набуття високих механічних і експлуатаційних властивостей деталей машин і устаткування, працюючих в умовах постійних високих навантажень, це доведено проведеними дослідженнями численних авторів при отриманні прокатних валків і інших високонавантажених виливків [30, 42-50].

Рідкісноземельні елементи - група з 17 елементів, що включає лантан, скандій, ітрій і лантаноїди. Усі ці елементи - метали сріблясто-білого кольору, притому усі мають схожі хімічні властивості. Згідно промислової класифікації металів [51] до РЗМ відносяться хімічні елементи з номерами 57-71 Періодичної системи Д.И. Менделєєва, що мають однакову кількість електронів на зовнішній оболонці атомів і відповідно схожі фізико-хімічні властивості. До рідкоземельних металів також відносять близькі до них перехідні метали третьої групи - ітрій і скандій.

У природі РЗМ зустрічаються у вигляді мінералів, загальний зміст РЗМ в земній корі складає 10-2мас.%, що значно більше, ніж молібдену, нікелю, вольфраму. У липні 2011 року дослідницька група з Японії виявила на дні Тихого океану великі поклади рідкоземельних матеріалів. Знахідка підтверджена зразками ґрунту, витягнутими з дна на глибинах від 3500 до 6000 м в 78 місцях. За оцінками фахівців, знайдені поклади містять від 80 до 100 млрд. метричних тонн рідкоземельних матеріалів, що значно більше поточних глобальних запасів на рівні 100 млн. тонн [52].

Фізичні властивості РЗМ, а також дані про їх кристалічну структуру уперше були узагальнені Гшнейдером у доповіді на симпозіумі по РЗМ в 1959р. у Чикаго [53].

Уперше при виробництві чавуну і сталі Лунд застосував церій [54]. У 1948-1950 рр. Моррoу (MorroughH) із співробітниками показав можливість застосування церію для отримання ЧШГ [55-58].

Літературний огляд показав, що дані по модифікуванню робочого шару прокатних валків виконання ЛПХНд-71 комплексним модифікатором, що містить РЗМ, і про вплив модифікування на їх структуру і властивості - відсутні. Таким чином, представляє інтерес визначити вплив комплексного модифікатора зі змістом РЗМ на властивості робочого шару прокатних валків.

Також в літературі і патентній документації існує велика кількість вдосконалених складів валкових чавунів з підвищеними експлуатаційними властивостями. Проте аналіз патентної документації і літературних даних показав, що дані про вплив додаткового легування диспрозієм, гафнієм і модифікування комплексом РЗМ на властивості і структуру таких чавунів відсутні. Видається науковий інтерес досліджувати і визначити вплив цих елементів і їх комплексну дію на валкові чавуни з різною структурою.

Проведений аналіз стійкості чавунних прокатних валків показав, що значна частина (до 30%) валків виходить з ладу передчасно по полому, що, очевидно, пояснюється їх низькою міцністю [4, 59]. Не менш ефективним методом підвищення міцності литих валків є проведення релаксаційної низькотемпературної відпустки з метою зняття ливарної напруги по перерізу валка. Численними авторами розглянута і обґрунтована доцільність і ефективність термічного оброблення прокатних валків, огляд робіт яких приведений нижче, проте дані про обґрунтовані режими обробки двошарових листопрокатних валків в літературі відсутні. Видається інтерес визначення, обґрунтування і дослідження впливу режиму релаксаційної відпустки для таких валків.

Практичне визначення параметрів заливання, охолодження і виявлення величини залишкової внутрішньої напруги, що є невід'ємною умовою розробки обґрунтованого режиму комплексної обробки для двошарових листопрокатних валків, на сьогодні, в лабораторних умовах, технічно не представляється можливим. Також важливо відмітити, що методики і можливості дос-

тупних комп'ютерних САПР і CAD програм, що дозволяють провести комп'ютерне моделювання процесу заливки і охолодження прокатного валка методом промивання, на сьогодні також відсутні. Таким чином, представляє науковий і практичний інтерес розробка методики моделювання заливки валків методом промивання, використовуючи доступні можливості комп'ютерних систем моделювання ливарних процесів.

З вищезгаданого визначено три напрями досліджень для підвищення експлуатаційних характеристик литих листопрокатних двошарових валків, які представляють науковий інтерес, а саме комплекс заходів складається з: а) визначення впливу комплексної обробки розплаву комплексним модифікатором, що містить РЗМ та релаксаційної відпустки, на структуру, механічні і експлуатаційні властивості валків; б) розробка методики моделювання заливання і охолодження валків методом промивання, використовуючи доступні можливості комп'ютерних систем моделювання ливарних процесів.

1.3 Характеристика абразивозносостійких чавунних корпусів насосів

Стійка робота збагачувальних фабрик з високим коефіцієнтом руху значною мірою залежить від високої зносостійкості деталей технологічного устаткування. Застосування зносостійких матеріалів (гуми, високохромистих чавунів, кам'яного литва) дозволяє вивільнити частину робітників, зайнятих на ремонтах збагачувального устаткування, зменшити кількість планових ремонтів, які неминуче ведуть до простою складних дорогих машин і, як наслідок, зниження економностійких матеріалів значною мірою залежить від кваліфікації працівників, обслуговуючих це устаткування [18].

Абразивний знос є основним видом зносу для виливків, що виготовляються зі зносостійких високохромистих чавунів. Такий знос характерний для великої групи устаткування і машин - шламові насоси, екскаватори, млини

для подрібнення руди, щічні і конусні дробарки, футерувальні плити бункерів і скіпів, тічки, жолоби, машини флотацій, змішувачі тощо.

Застосування високохромистих білих чавунів обумовлюється їх високою зносостійкістю в абразивних середовищах, за рахунок наявності в структурі металу високотвердих складових - карбідів і обмежується умовами роботи, пов'язаними з високими ударними навантаженнями. Зносостійкість виливків з цих чавунів в 5-10 разів вища, ніж з конструкційних сталей.

Основні чинники, що визначають знос, - абразивні властивості грантів, корисних копалини, що добуваються, навантаження і швидкість при зношуванні, кут атаки - зустрічі деталі з абразивною масою, фізико-механічні властивості матеріалів, абразиву і деталі.

Абразивність - стираюча здатність грантів, мінералів - підвищується при збільшенні в них зміст кварцу - найбільш абразиву, що часто зустрічається, збільшення гострокутності його часток, підвищення об'ємних розмірів і збільшення міри їх закріпленої. Закріплена часток підвищується у міру збільшення щільності ґрунтів, яка у свою чергу залежить від їх вологості, а також міри їх змерзання [4].

Великий вплив на термін служби матеріалів при абразивному зносі має твердість абразиву. Стійкість матеріалу в умовах чисто абразивного зносу залежить від співвідношення твердості абразиву (На) і матеріалу деталі (Нм) - коефіцієнт До=Нм:На. Встановлені критичні значення цього коефіцієнта До= 0,6÷0,7. Ці умови поширюються на абразивний знос з малими кутами атаки абразивних часток ($\alpha \approx 0$), в інших умовах експлуатації ці закономірності вимагають істотного коригування або не працюють [60, 61].

Дослідження абразивності гірських порід були проведені Л.І. Бароном і А.В.Кузнєцовою [62]. Спираючись на ці дослідження була створена класифікація гірських порід згідно їх абразивності (табл. 1.7). Ними був прийнятий метод випробувань, заснований на зношуванні торця сталевого стержня, що обертався, твердістю біля 1,8 кН/мм² і діаметром 8 мм об поверхню мінералу. Абразивність визначалася втратою маси цього стрижня.

Таблиця 1.7

Класифікація гірських порід і мінералів за абразивністю [62]

Клас	Характеристика порід	Абразивність, мг/хв	Характерні породи, що входять до класу
I	Дуже малоабразивні	До 5	Вапняки, мармури, м'які сульфіди, апатит, кам'яна сіль, глинисті сланці
II	Малоабразивні	5-10	Сульфідні і барито-сульфідні руди, аргіллити, м'які сланці
III	Нижче за середню абразивність	10-18	Джеспілити, роговики, магматичні тонкозернисті породи, залізняк
IV	Середньоабразивні	18-30	Кварцові і аркозові дрібнозернисті піщаники, діабази, крупнозернистий пірит, залізний кварц, окварцьовані вапняки
V	Вище за середню абразивність	30-45	Кварцові і аркозові середньо- і крупнозернисті піщаники, дрібнозернисті граніти, порфірити, габбро, гнейси
VI	Підвищеної абразивності	45-65	Граніти, діорити, порфірити, нефелінові сієніти, піроксеніти, кварцові сланці
VII	Високоабразивні	65-90	Порфірити, діорити, граніти
VII	Вкрай абразивні	Понад 90	Корундомістильні породи

Зустріч струменя абразиву з поверхнею деталі називається - кут атаки α. Кут атаки при роботі деталі в потоці абразиву стає одним з основних чинників, що впливають на інтенсивність і характер зносу. При $\alpha < 30^{o}$ деталь

руйнується в основному в результаті мікрорізання, а при α ≈90º – в результаті повторного ударного зносу.

Великі дослідження впливу кута атаки струменя на різні матеріали були проведені А.А.Антоновим [63] у легкоабразивному і Г.В. Топоровим зі співавторами [64] у гідроабразивному потоці. Виходячи з отриманих даних, вплив кута атаки на знос не залежить від середовища (води або повітря), що несе абразивні частки. Знос пластичних сталей при зміні кута α від 0 до 90º спочатку збільшується, а потім знижується, максимальний знос відбувається при α = 30÷45º. Матеріалів з високою твердістю і крихкістю, такі як білий чавун, швидкорізальні стали та ін., мають максимальний знос при α ≈ 90 º, а мінімальний при α < 30º.даних, вплив кута атаки на знос не залежить від середовища (води або повітря), що несе абразивні частки. Знос пластичних сталей при зміні кута α від 0 до 90º спочатку збільшується, а потім знижується, максимальний знос відбувається при α = 30÷45º. Матеріалів з високою твердістю і крихкістю, такі як білий чавун, швидкорізальні стали та ін., мають максимальний знос при α ≈ 90 º, а мінімальний при α < 30º.

Велику роль в зносі робить корозійний вплив абразивної маси. При порівняно малій абразивній складовій ряду сірчистого вугілля і високої їх корозійної активності корозія стає вирішальним чинником зношування деталей.

Вплив корозійної активності технологічної пульпи гірничо-збагачувальних комбінатів на процес зношування насосів багерів досліджений в роботі В.Т. Калініна [32]. Проведені дослідження показують, що в кислотних середовищах інтенсивність абразивного зношування різко зростає. Вже при pH5 інтенсивність зношування чавунів збільшується в порівнянні з інтенсивність зношування у водоабразивному середовищі у декілька разів [21, 65, 66]. Згідно, приведених досліджень [32], з розглянутих чавунних сплавів (ИЧХ210Х12Г5, ИЧХ210Х30Г3, ИЧ210Х33Н3С, ИЧ210Х33Г3) найбільш високі показники зносостійкості в абразивнокорозійних середовищах мав сплав ИЧХ210Х33Г3. Доведено, що вищих характеристик можна досягти за рахунок модифікування ультра дисперсним модифікатором TiCN.

Проте механізм процесу руйнування поверхневого шару насосу для усіх високохромистих чавунів буде представлений у вигляді актів знеміцнення тонкого поверхневого шару, що повторюються, в результаті утворення продуктів корозії з наступним руйнуванням і видаленням цих продуктів потоком абразиву, при цьому обидва процеси стимулюють один одного.

Деталі машин флотацій, шламових насосів, трубопроводів та ін., задіяні в перекачуванні пульпи працюють в умовах кавітаційно-ерозійної дії. В результаті дії кавітації - багатократних гідравлічних ударів, локалізованих в мікрооб'ємах поверхні, відбувається пластична деформація, а потім і руйнування деталей [67, 68].

Насос 5ГрК-8 є об'єктом дослідження і відноситься до ґрунтових насосів (землесоси). Такі насоси призначені для транспортування пульпи на великі відстані. На збагачувальних фабриках насоси застосовуються в основному для перекачування хвостів в хвістосховища. Їх пристрій і принцип дії аналогічні пристрою і принципу дії піскових насосів з центральним живленням, але вони відрізняються більшою подачею і натиском, а також конструкцією окремих елементів [18].

За результатами випробувань на знос матеріали, що вживають для швидкозношуваних деталей насосів, можна розділити на дві групи: зносостійкі чавуни, що містять хром, нікель, молібден; гуми, що містять велику кількість натурального каучуку. Застосування гуми обмежується не її здатністю (яка дуже велика) протистояти стираючій дії середовища, а механічним ушкодженням покриття [4]. З легованих сплавів найбільше поширення отримав хромонікелевий спеціальний сплав, умовно названий СС (ИЧХ28Н2 або 300Х28Н2). Зносостійкий сплав ИЧХ28Н2 є білим заевтектичним чавуном, типова мікроструктура якого складається з карбідів $(Cr, Fe)_7C_3$, фериту та аустеніту [3, 4].

Зносостійкість чавуну при абразивній дії головним чином залежить від його мікроструктури, а саме мікротвердості, форми, взаємного розташування і кількості структурних складових. Основні структурні складові чавуну у мі-

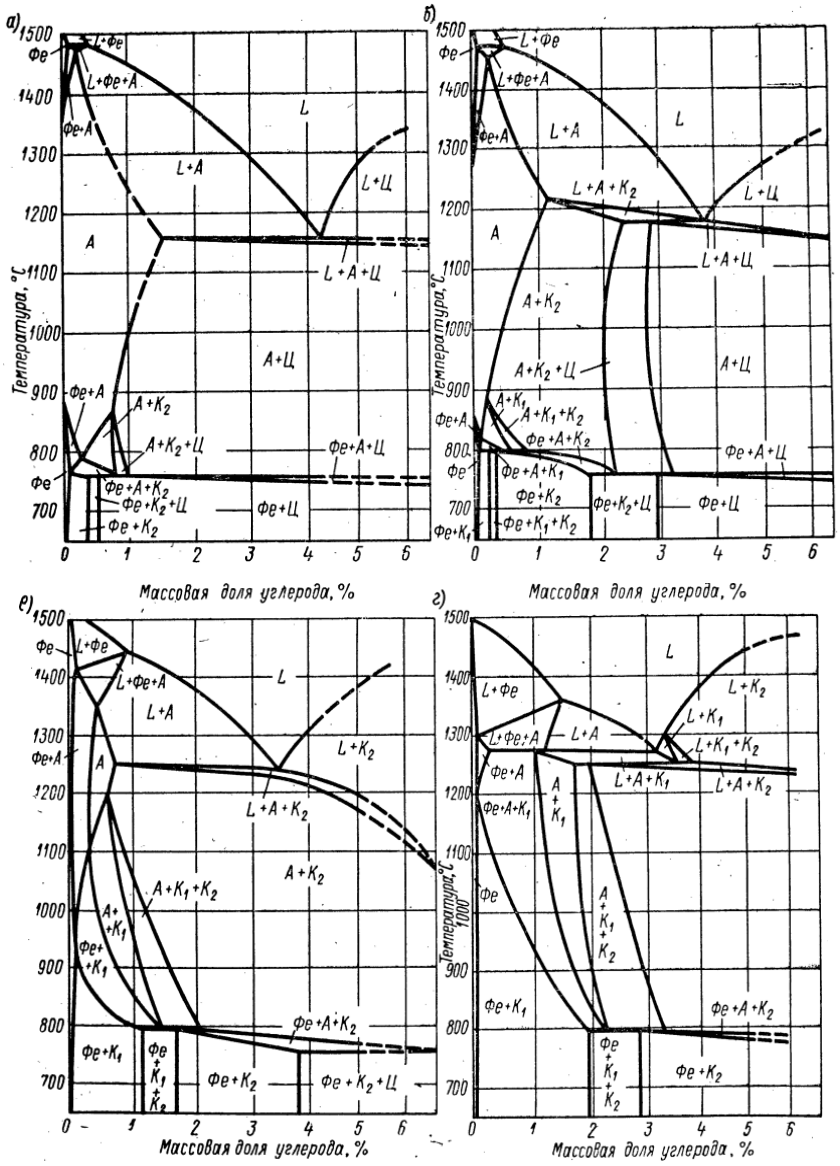
ру зростання їх мікротвердості: графіт, ферит, перліт, аустеніт, цементит, легований цементит, спеціальні карбіди хрому, ванадію і інших елементів, борід. Для збереження високої зносостійкості білих чавунів металева основа повинна міцно утримувати тверду складову і запобігати її крихкому руйнуванню.

Важливо відмітити, що у білих зносостійких чавунах первинний аустеніт є стійкішим, ніж вторинний, отримуваний при аустенітизації виливків. Пониження стійкості вторинного аустеніту пояснюється накопиченням дефектів кристалічної будови, що утворюються при фазових перетвореннях в твердому стані і меншою концентрацією вуглецю [3].

Основний легуючий компонент білих зносостійких чавунів - хром. Зіставлення кінетичних діаграм кристалізації хромистих чавунів із складом, близьким до евтектичного, показує, що збільшення вмісту хрому не чинить впливу на відносне положення лінії появи аустеніту. Зі збільшенням вмісту хрому в чавуні виділення графіту стає скрутним.

Хром в чавуні розширює і підвищує інтервал температур евтектичної рівноваги і зменшує вміст вуглецю в евтектиці. У системі виявлено декілька карбідних фаз: легований цементит $(Fe, Cr)_3C$, кубічний карбід $К_1$ складу $(Cr, Fe)_{23}C_6$, тригональний карбід $К_2$ складу $(Cr, Fe)_7C_3$. Система має три області евтектичноперитектичної рівноваги: Фе+А+$К_1$+L при 1275ºС, А+$К_1$+$К_2$+L при 1225ºС і А+Ц+$К_2$+L при 1175ºС і дві області евтектоїдно-перитектоїдної рівноваги: Фе+А+$К_1$+$К_2$ при 795ºС і Фе+А+Ц+$К_2$ при 760ºС. Діаграма Fe - C - Cr в метастабільному варіанті представлена на рис.1.1 [21].

Нікель в чавуні підвищує температуру евтектичної рівноваги в стабільній системі (1% Ni - приблизно на 4º) і знижує в метастабільній системі (1% Ni - приблизно на 6º), дані отримані за методикою [69] термодинамічним аналізом. Діаграма Fe - C - Ni недостатньо досліджена через трудності досягнення рівноваги внаслідок повільності дифузійних процесів, а діаграми метастабільного характеру не мають, по суті, практичного значення і тому не наведені. Нікель знижує температуру евтектоїдної рівноваги, знижує активність



а - 2% Cr, б - 8% Cr, в - 17% Cr, г - 24% Cr

Рис.1.1 - Розрізи діаграми Fe – C – Cr

вуглецю і стабілізує перліт. У області А+Ц нікель чинить зворотний вплив: підвищує активність вуглецю, знижує стійкість цементиту і сприяє графітизації чавуну [2].

Занадто високий вміст нікелю призводить до утворення значної кількості аустеніту, який знижує зносостійкість чавуну. Проте важливо враховувати і те, що недостатнє легування нікелем призводить до утворення м'якої перлі-

тової фази, яка знижує абразивну стійкість, в'язкість і опір ударній втомі чавуну [70].

Особливістю кристалізації хромистих чавунів є утворення твердих розчинів і цементиту, а при вмісті хрому вище 3% - спеціальних карбідів і твердого, немагнітного і крихкого інтерметаліду Fe - Cr, що містить 42-48% хрому і відомого як σ - фаза.

У білих чавунах збільшення вмісту хрому більше 10% призводить до утворення в структурі сплаву карбіду тригонального типу $(Cr, Fe)_7C$ [4]. Вже в інтервалі концентрацій хрому 9,5-12% цементитно-аустенітна евтектика $(Fe,Cr)_3C+A$ в первинній структурі чавуну замінюється евтектикою $(Fe,Cr)_7C_3+A$, це викликає зміни у будові евтектичних колоній і істотно відбивається на експлуатаційних і фізико-механічних властивостях такого чавуну [3].

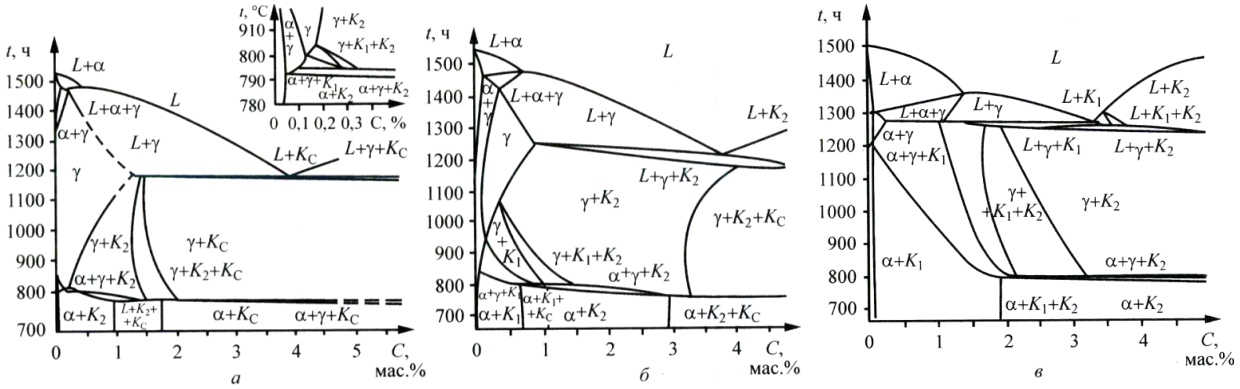
При кристалізації аустенітної хромистокарбідної евтектики карбіди типу M_7C_3 розташовуються у вигляді ізольованих тригональних карбідів в аустенітній основі, на відміну від ледебуриту з карбідами M_3C, які утворюють безперервну фазу.

Карбіди типу M_7C_3 є твердішими і дисперснішими, ніж карбіди M_3C, що забезпечує чавунам з карбідами першого типу вищу зносостійкість і міцність. Мікротвердість карбідів $(Cr,Fe)_7C_3$ складає 1200…1500 Нμ, що значно перевищує мікротвердість кварцу (~1000 Нμ), тоді як твердість карбідів цементного типу Fe_3C або $(Cr,Fe)_7C_3$ близька до мікротвердості кварцу і складає 800 - 1100 Нμ. Звідси стає з'ясовною висока зносостійкість високохромистих чавунів в умовах експлуатації [4].

При вмісті хрому в чавуні в межах від 0 до 9% чавун має тимчасовий опір при розтягуванні 160…260 МПа, при вигині – 320…470 МПа, стрілу прогину - 1,46…1,68 мм. При підвищенні вмісту хрому до 12-14% ті ж характеристики зростають до 340…450 МПа, 720…770МПа і 2,28…3,32 мм, відповідно [3].

Як правило, застосовують доевтектичні і евтектичні чавуни, оскільки в заевтектичних чавунах при кристалізації утворюються великі голкоподібні карбіди, що знижують зносостійкість і, особливо, міцність виливків. Тому необхідно так підбирати хімічний склад сплаву, щоб він не був заевтектичним. При вмісті в чавунах 12…18% хрому сплави, що містять більше 3,6% вуглецю, стають заевтектичними (рис. 1.2).

При вмісті хрому в межах 25…30% і близько 2,7% вуглецю пригнічення перлітового перетворення забезпечується без добавки інших легуючих елементів тільки в тонкостінних виливках.



а - 5%, б - 13% и в - 25% хрому

K_1 – $(Fe, Cr)_4C$; K_2 – $(Fe, Cr)_7C_3$; K_3 – $(Fe, Cr)_3C$

Рис.1.2 - Псевдобінарна діаграма стану Fe-C при різному вмісті хрому

При вмісті в чавуні близько 34% хрому і 1,5…2,2% вуглецю металева основа складається з фериту, що призводить до порівняно низької зносостійкості з цього сплаву в абразивних середовищах. Цей сплав має хорошу корозійну стійкість в окислювальних середовищах і в лугах, розчинах солей, морській воді, звичайній атмосфері і в сірчистих газах. Високохромистий чавун не стійкий в соляній кислоті і в розбавленій сірчаній. Цей чавун має хорошу жаростійкість при $t < 1200°C$ [14, 71].

Таким чином, максимальне збільшення міцності і інших конструкційних властивостей досягається при комплексному легуванні доевтектичних розплавів [2-4, 72-76].

Сьогодні сплав ИЧХ28Н2, як і раніше, широко застосовується в гірничорудній промисловості України і ближнього зарубіжжя для виробництва деталей корпусів насосів. Незважаючи на перехід значної частини насосного парку гірничо-збагачувальних комбінатів на насоси імпортного виробництва, основна частина запасних частин до них виготовляється на місцевих ливарних підприємствах, згідно технічної документації, розробленої з деталей представників, із сплаву ИЧХ28Н2 з причини високої вартості деталей імпортного виробництва. Слід зазначити, що вартість запасних частин із сплаву ИЧХ28Н2 вітчизняного виробництва, особливо виготовлених на свіжій шихті, також надзвичайно висока, оскільки у виробництві використовується велика кількість дороговартого ферохрому і нікелю. Також слід зазначити, що застосування насосів, виконаних з ИЧХ28Н2 в деяких галузях промисловості, наприклад, в цементній, обмежено, з причини того, що в процесі роботи нерідко можуть потрапляти великі шматки матеріалу, які призводять до заклинювання і як наслідок до руйнування корпусу насоса, у зв'язку з крихкістю матеріалу. Очевидно, що зниження вартості виробництва, за рахунок зниження кількості легуючих елементів, втрат від браку при підвищенні механічних властивостей зі збереженням або підвищенням експлуатаційних характеристик виробу представляє науковий і практичний інтерес. Найбільш поширені марки зносостійких чавунів приведені в табл. 1.8.

Проведений літературний аналіз показав високу ефективність використання комплексних модифікаторів, що містять РЗМ, Ca, Ba, Sr, Ti, Zr, у тому числі і для гірничо-збагачувального устаткування представлена в дослідженнях [3, 72-76]. Визначення властивостей і характеристик модифікованого високохромистих чавунів представляє науковий і практичний інтерес з причини відсутності необхідності в енергоємному термічному обробленні - загартуванні (як для сплаву ИЧХ28Н2).

Таблиця 1.8

Хімічний склад промислових високохромистих чавунів [4]

№ з/п	Тип чавуну	Хімічний склад, %							
		C	Cr	Si	Mn	Ni	Cu	P	Інші елементи
1.	Ніхард-4	2,6-3,2	8,0-9,0	1,8-2,0	0,4-0,6	5,0-6,5	–	–	до 0,5 Mo
2.	12СМо	3,0-3,5	11,0-14,0	0,5-0,8	–	до 0,1	0,5-1,0	–	0,5-1,0 Mo
3.	15% Cr-Mo	2,0-3,3	14-18	1,5max	2,0max	2,5max	≤1,2	0,1	≤3,0 Mo
4.	15-3С	2,4-2,8	14,0-16,0	0,5-0,8	0,5-0,8	–	–	0,1	2,4-2,8 Mo
5.	15-3МС	2,8-3,2	14,0-16,0	0,3-0,8	0,6-0,9	–	–	0,1	2,5-3,0 Mo
6.	15-3НС	3,2-3,6	14,0-16,0	0,3-0,8	–	0,7-1,0	–	0,1	2,5-3,0 Mo
7.	ЧХ16М2	2,4-3,6	13,0-19,0	0,5-1,5	1,5-2,5	–	1,0-1,5	0,1	0,5-2,0
8.	15-2-1	2,8-3,5	14,0-16,0	0,4-0,8	0,6-0,9	0,8-1,2	1,9-2,2	–	–
9.	ИЧ290Х28Н2	2,7-3,0	28-30	0,7-1,4	0,5-0,8	1,5-3,0	–	0,1	–
10.	ИЧ200Х33Н3	1,7-2,2	32,0-34,0	0,7-1,3	до 0,5	3,0-3,2	–	0,05	–
11.	ИЧ300Х33Н3	2,8-3,2	32,0-34,0	0,7-1,3	до 0,5	3,0-3,2	–	0,05	–
12.	ИЧ260Х17Н3Г3	2,4-2,8	14,0-22,0	0,5-0,7	1,8-3,5	1,8-3,5	–	0,1	–
13.	ИЧ290Х12М	2,6-3,0	11,5-13,0	до 0,7	0,5-1,0	–	–	0,1	1,4-1,6 Mo

1.3.1 Вплив хімічного складу на властивості виливків

Карбіди є найважливішою складовою зносостійких чавунів, яка у поєднанні з іншими фазами визначає експлуатаційні характеристики виливків. Кристалізація доевтектичних чавунів відбувається з утворенням надмірного аустеніту спочатку, а потім кристалізацією аустеніту і цементиту. Кристали первинного цементиту мають форму пластин, це пояснюється силами міжатомного зв'язку і анізотропією його кристалічної будови. Комплексний характер міжатомного зв'язку і шарувата структура цементиту обумовлюють анізотропію властивостей у білому чавуні.

По впливу елементів на структуру чавуну легуючі елементи поділяються на ті, що утворюють із залізом:

- тверді розчини заміщення - кремній, марганець, хром, фосфор і інші компоненти;

- розчини впровадження - вуглець, водень і азот.

Природа матричної фази евтектики в істотній мірі визначає властивості білого чавуну.

Для отримання аустенітно-карбідної структури в хромистих чавунах потрібний вміст хрому більше 23%, аналогічну структуру в марганцевих чавунах можна отримати при вмісті марганцю 7-10%. Цим для зносостійких чавунів пояснюється необхідність підтримувати високі концентрації карбідоутворювальних елементів.

При легуванні чавуну карбідоутворювальними елементами у кількості 1-3% мікроструктура чавуну характеризується дуже тонкою дендритною будовою, при цьому міждендритні простори заповнені тонкою цементитною евтектикою і компактними включеннями структурно вільного цементиту.

Сірка і фосфор - постійні домішки в чавуні, утворюють наступні з'єднання із залізом: FeS, FeS_2, FeS_3. Такі з'єднання значною мірою впливають на структуру і властивості чавуну. Сірка істотно зменшує зносостійкість, негативно впливає на фізико-механічні властивості і збільшує схильність до

утворення тріщин в чавуні. При вмісті сірки від 0,2 до 0,4% відзначається максимально низьке значення динамічної міцності. Також при підвищеному вмісті сірки (більше 0,2%) в доевтектичному білому чавуні спостерігається збільшення кількості структурно-вільного цементиту і укрупнення розмірів сульфідів марганцю, що призводить до підвищеної крихкості литих деталей.

Структура, яка утворюється в процесі твердіння Fe - P - C сплавів, істотно відрізняється від залізо вуглецевих сплавів евтектичного типу. Фосфід Fe_3P і кристали γ-розчину утворюють евтектику, яка має високу твердість при низьких температурах. В результаті легування чавунів великою кількістю фосфору до 7%, утворюється легкоплавка фосфідна евтектика, яка призводить до зниження температури початку кристалізації, збільшення переохолодження і, як наслідок підвищення твердості. Проте в процесі абразивного зносу окремі включення фосфідної евтектики легко викрошуються, що призводить до різкого підвищення зношування [3].

Вуглець з марганцем зв'язується в карбіди Mn_3C, Mn_7C_3 і $Mn_{23}C_6$, причому карбід Mn_3C ізоморфен з карбідом Fe_3C і утворює з ним тверді розчини. Марганець стабілізує аустеніт і цементит у білих чавунах. У чавунах, легованих марганцем, значною мірою утворюються карбіди типу $(Fe,Mn)_3C$. Морфологічний аналіз карбідо-аустенітної евтектики білих чавунів з вмістом марганцю більше 23% показав, що є присутнім комплексний тригональний карбід $(Fe,Mn)_7C_3$. Чавуни, леговані великою кількістю марганцю, схильні до підвищеної крихкості і появи скловидного зламу, що викликано утворенням пластин великої протяжності [3].

Марганець в ще більшій мірі, чим нікель знижує евтектоїдне перетворення Fe - C - сплавів і сприяє їх аустенітизації. Структура чавуну, що містить 5-6% Mn, при звичайних швидкостях охолодження - мартенситна, при 8-10% - складається з аустеніту і карбідів. Вміст марганцю більше 7% різко гальмує графітизацію. Марганцевий аустеніт порівняно з нікелевим, при їх однаковій твердості, більше схильний до наклепання, гірше піддається механічному обробленню і має менші значення ударної в'язкості [2].

Виходячи з кінетичних діаграм кристалізації зносостійкого чавуну, що містить 0,76-4,68% Mn, до 2,94% Si і до 4,26% C видно, що з підвищенням вмісту марганцю понад 0,76%, зона початку утворення цементиту повністю перекриває лінію початку виділення графіту, прибираючи область існування сірих чавунів. Якщо вміст C+Si підвищений, тоді в товстостінних виливках виділяється силікокарбід $(Fe,Mn)_7Si\text{-}C_2$ і зменшується кількість цементиту. Марганець збільшує кількість центрів утворення кристалів і швидкість зростання кристалів цементиту з евтектичної рідини [3].

Важливо відмітити, що сірка значною мірою може нейтралізувати дію марганцю, як і марганець здатний нейтралізувати дію сірки. У виливках з доевтектичного білого чавуну з вмістом марганцю в межах 0,9-2,2%, він не чинить помітного впливу на первинну структуру.

У білих чавунах, що використовуються для виробництва швидкозношуваних деталей, щоб уникнути графітоутворення в товстостінних виливках вміст кремнію не повинен перевищувати 0,6…0,9%, а вміст карбідоутворювальних елементів підвищується до 16,34%. У білих чавунах найчастіше в якості карбідоутворювального елементу використовують хром [3].

Особливості легування, оптимальний вміст, вплив на структуру і властивості білих зносостійких чавунів хрому і нікелю розглянуті раніше.

У роботі [77] автори досліджували вплив титану в кількості від 0,1 до 2% на властивості доевтектичного хромистого чавуну. Досліджуваний чавун містив 2,5% вуглецю і 16% хрому. В результаті проведених досліджень визначено, що твердість матриці зросла, при цьому міцність сплаву практично не змінилася. Іншим автором роботи [78] досліджувався вплив титану на властивості чавуну 15% Cr - Mo. Досліджували чавун, що містить, мас. %: 2,33-2,42 C; 14,93-16,89 Cr; 0,49-1,94 Si; 0,85-1,15 Mn; 0,36-0,7 Ni; ~3% Mo. Титан вводили у кількості 0,1-0,25-0,38%. Підвищення зносостійкості чавуну на 30% було досягнуто при введенні в сплав 0,38% титану і наступною 6-ти годинною аустенітизацією з 1050°C. Випробування на знос проводили абразивом Al_2O_3. Збільшення зносостійкості на 30% при випробуванні таким твер-

дим абразивом - добрий результат, оскільки висока твердість Al_2O_3 нівелює різницю в зносостійкості матеріалів. Автор приходить до висновку, що підвищення зносостійкості чавуну було пов'язане з підвищенням твердості металевої матриці.

У роботах [79, 80] було досліджено вплив легування титаном на властивості легованого валкового чавуну. Визначено, що введення до 0,5% титану знижує диференціювання перліту і не впливає на його анормальність. Дія титану на форму графіту в магнієвому чавуні проявлялася двояко і значною мірою залежала від способу введення в чавун. Присутність титану в розплавленому чавуні до обробки магнієм, призводило до утворення при кристалізації сильно подрібненого пластинчастого перліту, таким чином, титан діє як типовий демодифікатор. Добавка титану (губчастого) в рідкий чавун, оброблений магнієм, сприяла отриманню кулястого графіту, тобто діяла як модифікатор.

Легування чавуну молібденом, ніобієм, цирконієм, і іншими елементами є одним з найбільш ефективних методів підвищення механічних властивостей чавунів. Згідно з існуючими даними [81] легуючі елементи утворюють наступний спадний ряд по впливу на карбідоутворення в чавуні: Nb, Ti, V, W, Mo, Cr, Mn. Проте за даними [82] ніобій, незважаючи на велику спорідненість до вуглецю, сприяє або нейтральний по відношенню до графітизації внаслідок утворення зародків графіту при його взаємодії з вуглецем, азотом і киснем. При великих концентраціях ніобій може перешкоджати графітизації. Існуючі дані про вплив ніобію на графітизацію суперечливі, так, наприклад, в роботі [83] автор приходить до висновку, що добавки ніобію сприяють графітизації, а в роботі [84] – навпаки, перешкоджають.

При легуванні ніобієм утворюється тугоплавкий карбід NbC, який має гранецентровану кубічну решітку. Відомо, що ніобій збільшує міжатомні зв'язки, внаслідок чого, підвищується тривала міцність сплаву. Добавка ніобію до залізовуглецевих сплавів звужує і зрушує аустенітну область у бік

вищих температур, також переміщує евтектоїдну точку у бік великого вмісту вуглецю.

Отримані при легуванні ніобієм карбіди повільно розчиняються в аустеніті [85], нерозчинені частки, що залишаються, сприяють отриманню дрібнозернистої структури. Також в роботі [86] відмічено, що добавки ніобію в чавун підвищували мікротвердість структурних складових чавуну.

Концентрація ніобію для перлітових чавунів рекомендується в межах 0,03÷0,06%, а для білих чавунів - не більше 0,3% для збільшення зносостійкості за рахунок наявності карбідів ніобію в матриці.

Вивчення патентної і технічної літератури згідно досліджуваної номенклатури зносостійких деталей показало, що валки для гарячого прокатування з високоміцного чавуну легують 0,2-2,5% ніобію, чим підвищують зносостійкість, атмосферостійкість і стійкість до тріщиноутворення або за рахунок введення 0,05÷2,5% ніобію і (чи) танталу в чавуні містяться дисперсні карбіди (нітрид або карбонітриди) ніобію і танталу, рівномірно розподілені в матриці, які підвищують опір зносу, не деформуючи графіт. Автором [86] досліджувався вплив ніобію у вигляді чистого металу і фероніобію на властивості половинчастих валкових чавунів. Легування ніобієм, при введенні його у вигляді чистого металу у кількості 0,075÷0,75% сприяло збільшенню чистого відбілу. Введення ніобію у вигляді фероніобію, що містить алюміній і титан, також збільшував глибину чистого відбілу, при цьому інтенсивність впливу була меншою. При введенні ніобію у вигляді чистого металу максимальна кількість цементиту була отримана при його вмісті 0,19÷0,33%. При легуванні фероніобієм максимальна кількість цементиту була отримана при вмісті 0,33÷0,48%. Будова перліту ставала менш тонкою при вмісті 0,33÷0,95% ніобію, при менших концентраціях перліт не відрізнявся від початкового стану. Ніобій розчинявся в матриці в невеликій кількості, при цьому мікротвердість перліту зростала. Легування ніобієм від 0,07% і більше утворювало в структурі чавуну спеціальні карбіди, розмір і кількість яких збільшується у міру збільшення змісту ніобію. Також збільшення глибини відбілу знаходилося в

прямо пропорційній залежності від величини переохолодження при евтектичній кристалізації. Проте легування чавуну ніобієм більше 0,25%, коли спостерігалося виділення великої кількості спеціальних карбідів, мало впливало на величину переохолодження. Оскільки при введенні ніобію величина переохолодження вища, то відповідно вище також і його відбілювальна здатність, чим наприклад, при введенні титану. Твердість, межа міцності при вигині і зносостійкість чавуну, легованого ніобієм, в порівнянні з нелегованим чавуном зростали. Автор рекомендує концентрацію ніобію у валковому чавуні - від 0,19 до 0,38%.

При введенні в чавуни доевтектичного складу усі ці елементи підвищують міцність і стійкість ледебуриту і переміщають криві ізотермічного перетворення аустеніту управо [87-89], що підвищує стійкість аустеніту в зносостійких виливках. Окрім вищезгаданого, очевидно, що хімічний склад сплаву, розміри виливків і умови їх охолодження, зумовлюють міру легованості металевої основи чавуну, його фізико-механічні і експлуатаційні властивості. Крім того, ці елементи - активні карбідоутворювальні метали.

Кінетичні діаграми кристалізації чавуну дозволяють детально аналізувати роль легуючих елементів і домішок в процесах структуроутворення.

Класифікація легуючих елементів, які здатні збільшити відбілюваність чавуну, розташовані в наступному порядку у міру зростання їх дії: марганець, молібден, хром, ванадій, телур.

Також збільшити відбілюваність здатні спеціальні модифікувальні добавки: магній, церій і інші РЗМ [4, 28]. При кристалізації білого чавуну значний вплив здатні чинити елементи, які мають більшу, ніж залізо спорідненість до вуглецю, як наприклад: титан, цирконій, ніобій, ванадій. При легуванні цими елементами розплавів доевтектичного складу рідка фаза, внаслідок утворення карбідів, обідняється вуглецем. Карбіди при мікролегуванні цими елементами здатні утворюватися тільки при пониженому вмісті азоту в чавуні, інакше вони зв'язуються в нітрид, що мало впливає на переохолодження розплаву.

1.3.2 Вплив теплового оброблення на якість і властивості виливків

Теплове оброблення – це процес обробки сплавів з метою зміни їх структури, а отже і властивостей, що полягає в нагріві до певної температури, витримці при цій температурі і наступному охолодженні із заданою швидкістю [90]. У ливарному виробництві теплове оброблення застосовується для надання металу комплексу механічних і експлуатаційних властивостей.

У роботі [42] були проведені дослідження і визначений вплив термічного оброблення на властивості чавунних прокатних валків. Визначено, що за допомогою теплового оброблення можна ефективно виконати штучне старіння, з метою набуття високих фізико-механічних властивостей прокатних валків.

Залишкова напруга в чавунних валках, що виникає в процесі кристалізації, зберігається до введення їх в експлуатацію [91-95]. Напруга, що виникає в процесі експлуатації валків, працюючих в умовах високих температурних навантажень, тисків і швидкостей, у поєднанні із залишковою внутрішньою напругою нерідко призводять до руйнування валка.

Термічне оброблення, як правило, проводять для підвищення міцності і зниження залишкової внутрішньої напруги. Також теплове оброблення іноді застосовується для поліпшення оброблюваності за рахунок зниження твердості поверхні. У зарубіжній практиці теплова обробка знайшла широке застосування, проте режими термічної обробки практично не приводяться, але відзначається, що її застосування при виробництві валків призводить до істотної зміни структури і, як наслідок, підвищення фізико-механічних властивостей. Нині у вітчизняному вальцеливарному виробництві усе більш широке поширення знаходить штучне старіння.

Режими теплового оброблення прокатних валків з метою штучного старіння проводили багато дослідників. Так, наприклад, O. Bauer і K. Sipp [96] відмічали, що вже при нагріванні до 150°С залишкова напруга знижується, а при температурі понад 550°С спостерігається значне зниження твердості

без помітного зниження залишкової напруги. Максимальне зниження напруги відбувалося при температурах 500-550°С. Температуру 550°С рекомендують і автори [97-99]. У роботах [100-103] рекомендується температура 650°С, а авторами [104] рекомендується температура відпалу 600°С. В роботі Л.Х. Іванової [42] досліджувалися режими подвійного відпалу прокатних валків з чавунів, модифікованих РЗМ. Показано, що оптимальними параметрами подвійного відпалу для валків з модифікованих чавунів були на першій стадії температура 920°С і витримка 0,5 год., на другій стадії температура 550°С і витримка впродовж 1,5 год., при цих параметрах термічного оброблення властивості були оптимальними.

У зносостійких хромистих чавунах наявність навіть невеликої кількості м'яких продуктів розпаду в структурі основи призводить до різкого зниження зносостійкості чавуну. Пригнічення перлітового перетворення при литті пов'язане з необхідністю легування сплавів значною кількістю дорогих і дефіцитних елементів. Але наявність великої кількості таких елементів не дозволяє отримати необхідну структуру у виливках з великим перерізом унаслідок повільного охолодження їх у формі. Так, наприклад, автори T. Norman, A. Solomon, P. Doane [105] вказують, що в структурі 15% Cr - Mo чавуну, що широко застосовується в зарубіжній практиці, з товщиною стінки понад 40 мм після охолодження у формі міститься значна кількість троостито-сорбіту або перліту. Проте цей же чавун після загартування на повітрі, навіть у виливках з товщиною стінки до 180 мм, не має продуктів перлітового розпаду. З причини низької теплопровідності і пластичності зносостійких білих чавунів загартування виливків з них у воді і маслі не припустиме, оскільки навіть при товщині стінки 40мм це призводить до утворення гартівних тріщин.

Для успішного пригнічення перлітового і проміжного перетворень критично важливою є критична швидкість загартування, тому що при недостатньому прожарюванні не представляється можливим забезпечити необхідну структуру металевої основи чавуну і, як наслідок, високу зносостійкість.

Прожарювання сплаву - одно з основних властивостей, що визначають зносостійкість литва та можливість отримання мартенситної структури основи при охолодженні литих деталей на повітрі. Застосування загартування дозволяє отримати мартенситно-аустенітну структуру при меншому легуванні чавунів дефіцитними і дорогими легуючими елементами.

М.Є. Гарбер [4, 28] досліджував вплив на прожарювання найважливіших елементів, що входять до складу білих зносостійких чавунів. Вуглець змінює тип і кількість карбідів і впливає на металеву основу. Вивчення впливу різних концентрацій вуглецю проводилися на основі високохромистих чавунів (12-14% Cr, 1,4-1,6% Mo). Визначено, що при збільшенні вмісту вуглецю різко знижується прожарювання, яке викликано, мабуть, збідненням твердого розчину хромом і молібденом внаслідок утворення карбідів M_7C_3 і M_3C. Такі чавуни зі вмістом до 2% вуглецю мають порівняно високе прожарювання. Мартенситну структуру основи можна отримати у виливках товщиною стінки не більше 50 мм, вже при вмісті 2,5% С подавити перлітове перетворення представляється можливим тільки при стінці 30мм. У свою чергу вміст 2,9% С дозволяє мати однаково високу зносостійкість навіть при перерізі 100мм в деталях з чавунів ИЧ290Х12Г5 і ИЧ290Х12Г3М. Особливо високу прожарюваність має чавун ИЧ300Х18Г3.

За даними авторів [106] вуглець впливає аналогічно і на хромомарганцевисті чавуни. Вуглець знижує міру і температуру мартенситного перетворення, внаслідок чого збільшення вмісту вуглецю з 1,96% до 3,57% знижує температуру мартенситного перетворення з 200°С до 70°С, за цього кількість залишкового аустеніту при охолодженні до 20°С збільшується з 7 до 38%.

Збільшення вмісту кремнію в чавуні ИЧ300Х12М різко знижує прожарювання, в структурі основи збільшується кількість продуктів дифузійного розпаду. Підвищення вмісту кремнію з 0,55 до 1,18% в Cr - Mo чавуні удвічі зменшує переріз виливків, що мають мартенситну структуру. Тому М.Є.Гарбер рекомендує вміст Si не більше 0,7% для забезпечення задовільної

прожарюваності в цих чавунах. Для Cr – Mn -вих чавунів Є.В. Рожкова у своїх дослідженнях приходить до висновку, що вміст кремнію має бути не більше 1,2%.

Нікель - один з основних легуючих елементів у білих зносостійких хромистих чавунах, вводитися з метою пригнічення перлітового перетворення. Використовуваний на вітчизняних підприємствах чавун ИЧ290Х28Н2 містить до 3% Ni, який у поєднанні з 30% вмістом хрому сильно стабілізує аустеніт і знижує температуру мартенситного перетворення, що призводить до отримання аустенітно-феритної металевої основи і зниження зносостійкості цього чавуну [4, 28]. Для евтектичного чавуну типу ніхард нікель повинен варіюватися в межах від 4,0 до 8,0% залежно від товщини стінки виливка. З метою надання чавуну максимальної в'язкості рекомендується виливок піддати термічному обробленню [33], такі чавуни застосовуються в умовах високих ударних навантажень і дії корозії.

При дослідженні Cr - Mo - чавунів з'ясували, що вміст хрому від 13,6 до 17,0% збільшує прожарюваність чавунів, вже при 25% Cr знижується, а при 29% Cr металева основа плити завтовшки 30мм складається тільки з феритно-карбідної суміші. Підвищення хрому з 12 до 17% призводить до підвищення його вмісту в твердому розчині, що сприяє стабілізації аустеніту і збільшенню прожарюваності, схожа картина спостерігається і в хромомарганцевих чавунах.

Чавуни з однаковим вмістом хрому, кремнію і марганцю за різного вмісту хрому, істотно відрізняються своєю прожарюваністю. Так, наприклад, чавун зі вмістом 13% хрому і 3,43% марганцю, має твердість HRC60 при перерізі не більше 75 мм, а чавун з 18,6% хрому за такого ж вмісту марганцю має твердість HRC60 навіть при перерізі 400 мм. Подальше підвищення вмісту хрому до 24% призводить до зменшення твердості в усьому діапазоні товщин. Схожий результат був отриманий в роботі F. Morafray [107].

Ефективним методом підвищення прожарюваності чавунів є збільшення температури загартування. Підвищення температури призводить до роз-

чинення первинних карбідів, які знаходяться в металевій основі, і збільшення в аустеніті легуючих елементів.

Відпуск - часто необхідна операція теплового оброблення, метою якої є зняття внутрішньої напруги, утвореної після загартування.

Дослідження впливу теплового оброблення на властивості подрібнювальних тіл, украй обмежені, мабуть, через особливості конструкції і розміри цього виливка. Подрібнювальні тіла, як правило, отримують на карусельно-кокільних кулеливарних машинах, тому представляє великий науковий інтерес дослідження впливу різних середовищ, що охолоджують, на властивості таких виливків після витягання їх з кокільних форм.

Основною метою дисертаційної роботи було проведення наукового обґрунтування з подальшим лабораторним і промисловим випробуванням нових перспективних рішень з удосконалення технологічних процесів виготовлення виливків зі зносостійких білих чавунів різного ступеня легованості, шляхом розробки та визначення впливу модифікаторів, що містять рідкісноземельні метали (РЗМ), а також індивідуальний або спільний з термічним обробленням вплив на процеси структуроутворення, фізико-механічні та експлуатаційні властивості зносостійких чавунів, що працюють при високих навантаженнях в процесі експлуатації.

Це призведе до вдосконалення існуючих процесів виготовлення виливків металургійного та гірничорудного призначення за наступними напрямами:

1. Застосування комплексного модифікування чавунних розплавів різної легованості.
2. Розробка раціональних технологічних процесів виготовлення виливків.

1.4 Висновки за розділом 1:

1. Аналіз сучасного стану виробництва виливків зі зносостійких чавунів і відповідної науково-технічної літератури виявив, що роботи по розробці теоретичних основ і практичного комплексу методів отримання виливків з комплексно модифікованих зносостійких чавунів є актуальними і спрямованими на рішення значної науково-технічної задачі.

2. Яскравими представниками високо навантажених деталей гірської і металургійної промисловості, що виготовляються з чавунів різного ступеня легованості є: подрібнювальна куля, двошаровий листопрокатний валок та корпус насосу багеру. Вибрані деталі об'єднує те, що вони схильні до інтенсивного зносу, є швидко зношуваними деталями відповідального технологічного устаткування і виготовлюються зі зносостійких чавунів.

3. Аналіз діючих технологій виробництва виливків із зносостійких білих чавунів на металургійних підприємствах України показав, що якість одержуваних виливків недостатньо висока та є необхідність в удосконалення технологічних процесів їх одержання.

4. Пропонується провести обґрунтування (з подальшим лабораторним і промисловим випробуванням) та удосконалення раціональних технологічних процесів виготовлення виливків з різних зносостійких білих чавунів за наступними напрямами:

– для литих подрібнювальних куль з низьколегованих чавунів використання та комплексне урахуванням впливу технологічних параметрів виробництва таких як матеріал та конструкція ливарної форми, модифікування розплаву, час витримки виливка у формі, температура вибивання, середа охолодження;

– для литих двошарових прокатних валків із середньо легованих чавунів використання та комплексне урахуванням впливу технологічних параметрів виробництва таких як модифікування розплаву та теплова обробка литих заготовок;

– для виливків з високохромистих чавунів з підвищеними міцністними і експлуатаційними характеристиками використання зменшеного вмісту легувальних елементів у складі чавунів під впливом комплексного модифікування розплавів.

Матеріали розділу опубліковано у [16, 20, 30, 31, 59].

РОЗДІЛ 2

ЗАСТОСОВНІ МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРІМЕНТАЛЬНИХ РОБІТ

Методи дослідження і обробки експериментальних даних були вирішені наступним чином.

2.1 Застосовувані матеріали

Особливості модифікуючого впливу комплексних модифікаторів, що містять РЗМ, досліджували в лабораторних і промислових умовах на чавунах, хімічні склади яких наведено в наступних розділах.

В якості основних шихтових матеріалів при проведенні експериментів застосовували чушкові чавуни, сталевий брухт, феросплави (табл.2.1). Хімічні склади модифікаторів наведені в наступних розділах.

2.2 Умови плавки, модифікування і розливання чавунів

Лабораторні та промислові плавки проводили в ливарному цеху ПАТ «Марганецький рудоремонтний завод» в індукційній і дуговій електропечах місткістю 60, 2000 і 3000 кг, а також в лабораторних умовах в індукційній і силітовій печах.

Дослідний сплав зносостійкого хромистого чавуну виплавляли в дуговій печі моделі ДСП3,5А. В якості шихтових матеріалів застосовували повернення виробництва ІЧХ28Н2, високовуглецевий ферохром і нікель електролітичний, для навуглецьовування використовували стандартні карбюризатори, в тому числі сірий чавун. Сплав для виробництва виливків «куля» виплавляли в індукційній печі моделі ІЛТ-2,5. Як шихтові матеріали використовували стандартні компоненти для виплавки чавуну.

Таблиця 2.1

Характеристика шихтових матеріалів

Найменування матеріалу	Марка	НД	Зміст хімічних елементів, %						
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
Чавун переробний	ПЛ2,	ДСТУ 3133-95	4,0–4,5	0,5–0,9	0,9–1,5	≤ 0,08	≤ 0,03	-	
Чавун ливарний	Л2	ДСТУ 3132-95		3,2-3,5	0,2-0,9	≤ 0,08	≤0,05		
Сталевий брухт	2А,2Б	ДСТУ 4121–2002	≤ 0,2	≤ 0,2	≤ 0,5	-	≤ 0,03	-	
Звороти виробництва	ИЧХ28Н2	-	2,7-3,0	0,7-1,4	0,5-0,8	≤ 0,10	≤ 0,02	28-30	1,5-3,0
Феромарганець	ФМн88	ДСТУ 3547-97	≤ 2,0	≤ 3,0	85–95	≤ 0,10	≤ 0,03	-	
Феромарганець	ФМн78		≤ 7,0	≤ 6,0	65–75	≤0,50	≤ 0,03	-	
Феросиліцій	ФС75	ДСТУ 4127:2002	≤0,2	74-80	≤0,4	≤0,05	≤0,02	-	
Ферохром	ФХ800А	ДСТУ ГОСТ 4757:2009	≤ 8,0	≤ 2,0	-	0,03	0,06	65,0	
Нікель	Н-1	ГОСТ 849-2008	≤ 0,01	≤ 0,002	≤ 0,001	≤ 0,001			99,93

Модифікування розплавів здійснювали в окремому ковші місткістю 60 кг, розрахункові кількості модифікаторів завантажували на дно ковша перед випуском розплаву з плавильного агрегату. Після витримки протягом 15...20 хв. і транспортування здійснювали розливання готового розплаву. З кожної плавки заливали два комплекти зразків: стандартного хімічного складу і модифіковані.

Контроль температури металу в печі і ковші здійснювали за допомогою хромель-алюмелевих датчиків температури занурення, встановлених на приладі визначення температури розплавленого металу «Термокон-1».

Після модифікування і витримки, при досягненні температури розплаву 1320°С, метал заливали в заздалегідь підготовлені ливарні форми для отримання різних зразків: а) діаметром 30 і висотою 250мм, б) діаметром 70 і висотою 150 мм (рис. 2.1 і 2.2) або куль діаметром 80 мм.

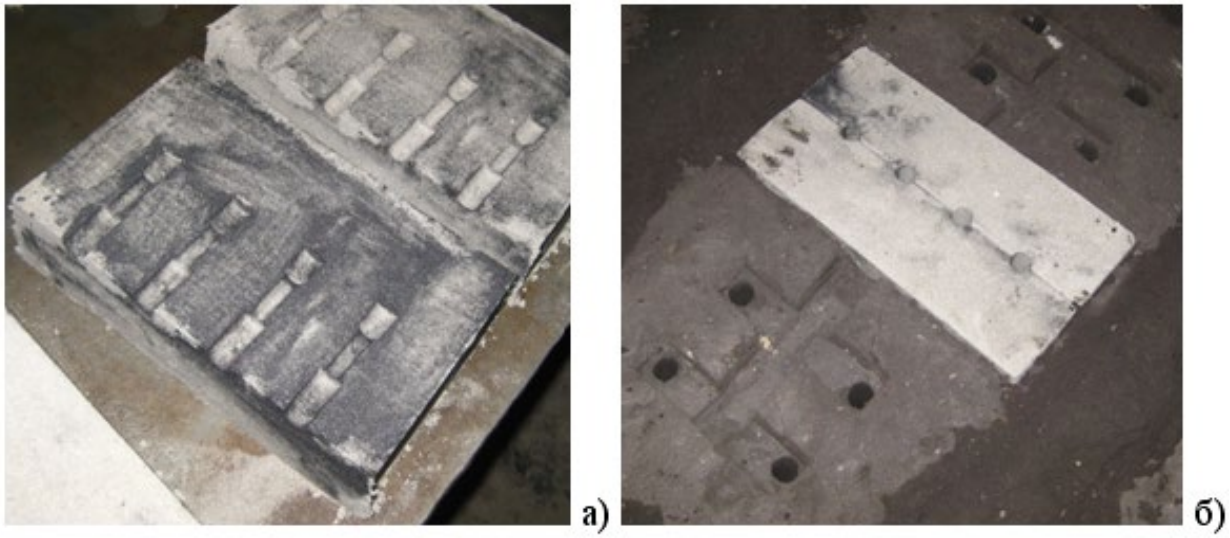


Рис. 2.1. Підготовка ливарної форми до заливання:
а - ХТС стрижень з порожниною, що повторює форму зразків для механічних випробувань; б – стрижнева ливарна форма в складеному вигляді

Рис. 2.2. Литі зразки, які одержані в стрижневій і піщаній ливарних формах

Для визначення механічних властивостей зносостійкого високохромистого чавуну відливали зразки згідно ГОСТ1497-84. Вибивання зразків здійснювали після охолодження їх до температури 70...30°С. Для підвищення оброблюваності зразків і зняття напружень здійснювали відпал за режимом: нагрівання до 750°С, витримка протягом 50хв і охолодження з піччю. Після відпалу отримані зразки піддавали механічному обробленню для отримання геометричних розмірів, відповідних стандарту.

Для визначення властивостей і структури дослідного сплаву для виробництва прокатних валків відливали зразки циліндричної форми діаметром 20...50 і висотою 130...200 мм в кокільній і піщаній формах, що забезпечувало швидкості охолодження, які мають місце в реальній валковій ливарній формі, - від 1,0 до 6,0 град/с [31]. Зразки для дослідження мікроструктури, фізико-механічних властивостей і службових характеристик вирізали від нижнього торця бочок і нижній шийці при механічному обробленні литих прокатних валків. Детальне дослідження структури і властивостей матеріалу дослідних валків до і після теплового оброблення здійснювали на зразках, відібраних при механічному обробленні відповідно до схеми (рис.2.3).

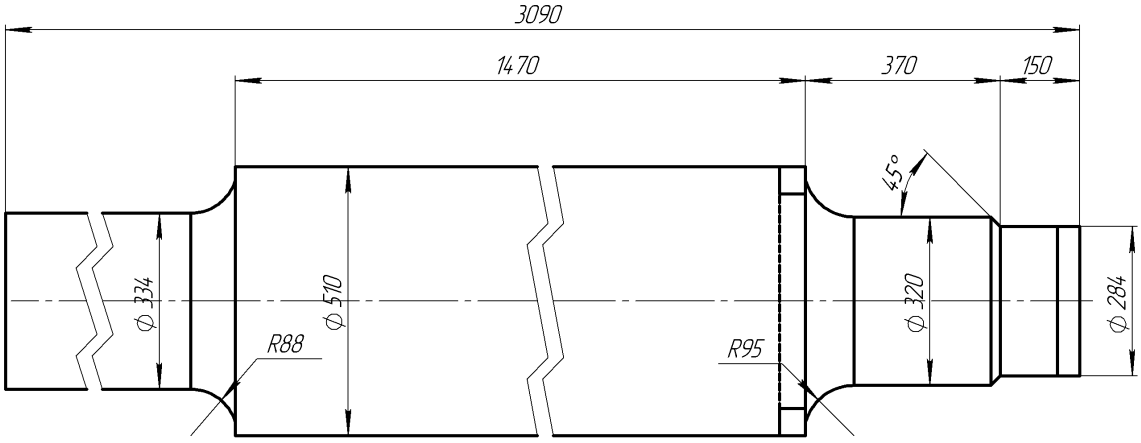


Рис. 2.3. Схема відбору зразків для випробовування механічних властивостей, хімічного аналізу та металографічних досліджень від натурних зразків - прокатних валків

2.3 Метод теплового оброблення

У лабораторних умовах термічне оброблення проводили на установці, яка включала муфельну піч і систему автоматичного контролю (рис. 2.4), а також на установці ВДТА-8М. У промислових умовах термічне оброблення здійснювали в камерній печі з висувним сподом.

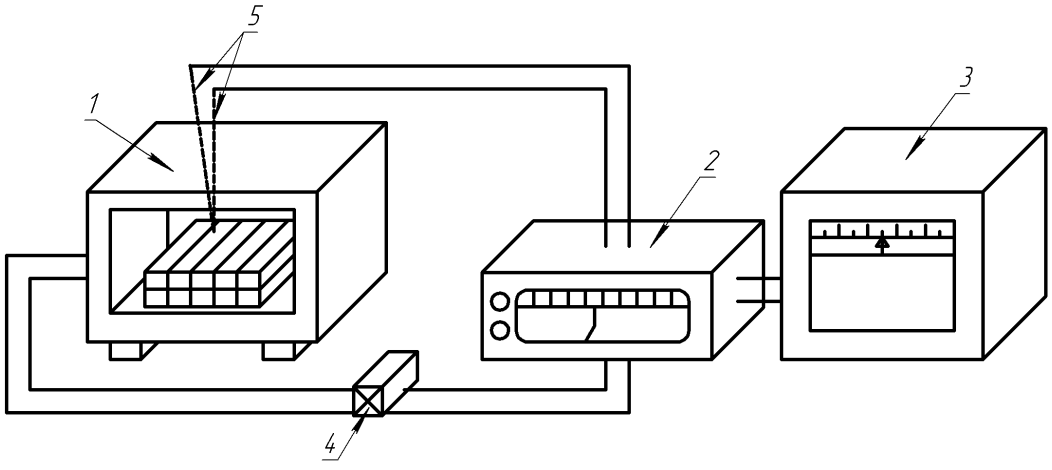


Рис. 2.4. Схема установки для проведення термічного оброблення: 1 - муфельна піч; 2 – регулюючий устрій; 3 – вимірювальний прилад; 4 – магнітний запускач; 5 – датчик температури ПП

2.4 Хімічний аналіз

Проби для хімічного аналізу чавуну відбирали з плавильної печі під час випуску металу (немодифікований чавун) і з розливного ковша після модифікування. У немодифікованих чавунах залежно від призначення сплаву, визначали вміст вуглецю, кремнію, марганцю, хрому, нікелю, міді, ніобію, алюмінію, фосфору і сірки. В модифікованих чавунах, крім перерахованих вище хімічних елементів, визначали залишкові вмісти магнію або РЗМ [30].

У промислових і лабораторних умовах експрес-аналіз хімічного складу чавуну в процесі плавок і досліджень здійснювали на спектрометрі SPEKTROMAX CCD type: LMXM3 виробництва компанії «SPEKTRO» Німеччина.

2.5 Металографічний аналіз

Мікроскопічне дослідження проводили на оптичних металомікроскопах МІМ-7, МІМ-8М, Neophot 21 і Axiovert 200M MAT з програмним забезпеченням Axiovision 4.6, при збільшеннях 50...500. Шліфи досліджували до і після травлення. В якості основного травильника використовувати 2%-ний розчин азотної кислоти в етиловому спирті (ніталь). Кількість структурних складових визначали точковим методом Глаголєва в 20...195 полях зору при збільшенні 400, що забезпечувало абсолютну похибку 1% і достовірність 0,9544 [108]. Будову матриці чавунів оцінювали за ГОСТ 3443-87, анормальність перліту - за шкалою [109].

Макроструктуру зразків досліджували методом растрової електронної мікроскопії [110] з використанням мікроскопу МРЕМ-100М, при прискорюючій напрузі 10...30 кВ у вторинних електронах при збільшеннях від 300 до 10000.

2.6 Визначення фізико-механічних властивостей

Твердість БЧ за Роквеллом визначали за ДСТУ ISO 6508-1:2013, використовуючи алмазний конус з кутом при вершині 120° (шкала С). Визначення твердості за Бринеллем здійснювали за ДСТУ ISO 6506-1:2007 на приладі ТШ-2М і динамічному твердомірі ТДМ-1 за допомогою стальної кульки діаметром 10 мм при навантаженні 29420 Н. Величину твердості розраховували як середню з п'яти вимірів.

Мікротвердість визначали на приладі ПМТ-3 при навантаженні 50 Н.

Межу міцності при розтягу σ_B зразків діаметром 6 мм і міцності при вигині $\sigma_и$ зразків розмірами 10х10х55 мм визначали за ГОСТ 1497-73 і ГОСТ 14019-80, відповідно, на універсальної машині МУП-50. Величину меж міцності розраховували як середню трьох випробувань. Ударну в'язкість чавунів визначали на зразках без надрізу за ГОСТ 9454-78 на машині МК-30А.

2.7 Визначення ударостійкості

Оцінку працездатності виливків, що підлягають ударним навантаженням, здійснювали за показником ударостійкості. Ударостійкість визначали на спеціальній установці за кількістю ударів при падінні зразка - кулі діаметром 80 мм з висоти 6,5 м з частотою 150 ударів/год. Для прискорених випробувань застосовували спеціальний копер, в якому руйнування зразка проводилося вантажем масою 101 кг, який падав з висоти 0,5 м з частотою 10 ударів/хв до руйнування виливка [111].

2.8 Визначення зносостійкості

Зносостійкість дослідних високо хромистих сплавів досліджували на установці типу стенду ЛП3-М, розробленого ВНІІПТ «Вуглемаш» (рис.2.5).

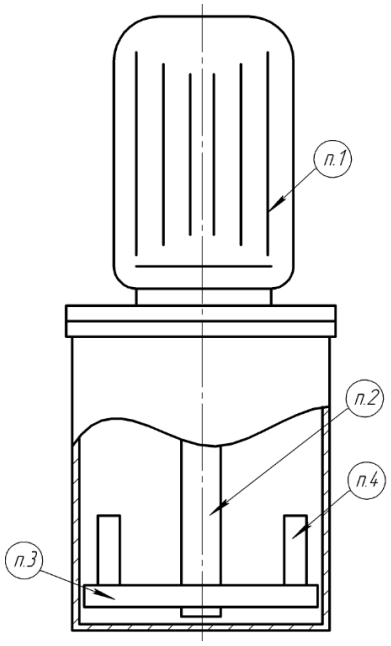


Рис. 2.5. Установка типу стенда ЛП3-М для випробування на гідроабразивний знос: п.1 - електродвигун; п.2 - вал; п.3 - диск для кріплення зразків; п.4 – зразки, закріплені на диску

Принцип роботи стенду полягав в тому, що підготовлені зразки розміщували в чаші і обертали в середовищі, що складається з кварцового піску і води в співвідношенні 2:1 [112,113]. Подібне середовище дозволяє оцінити зносостійкість сплаву в умовах гідроабразивного зношування при експлуатації багерних насосів. Зразки перед випробуванням знежирювали чотирьоххлористим вуглецем і зважували на демпферних вагах моделі ВЛА-200М.

Після випробування зразки повторно промивали і зважували. Зносостійкість чавуну оцінювали по втраті маси зразка як середню з п'яти випробувань.

Зносостійкість досліджуваних валкових чавунів визначали на установці СМЦ-2 при терті ковзання з зусиллям 70 МПа.

2.9 Визначення термостійкості

Термостійкість досліджували на зразках розмірами 10х10х20 мм, які піддавали циклічному нагріванню до температури 650 ± 10ºС і охолоджуванню у водяній ванні при температурі 20 ± 2ºС, максимально наближаючись до теплових умов роботи валків [30, 114-116]. Зразки піддавали металографічному аналізу після перших трьох циклів і через сто теплозмін. Критерієм термостійкості була величина питомої протяжності тріщин на полірованому шліфі після ста теплозмін. Величину термостійкості розраховували як середню з трьох випробувань.

2.10 Планування експерименту і комп'ютерне моделювання технологічних процесів

У лабораторних умовах досліджували вплив конструкції кокілю для отримання виливка куля на параметри охолодження виливка у формі.

Для виконання комп'ютерного моделювання застосовували комплекс комп'ютерних CAD систем, що включають в себе один з найбільш розповсюджених на сьогоднішній день програмних комплексів САПР для автоматизації робіт промислового підприємства на етапах конструкторської та технологічної підготовки виробництва Solid Works [117] і систему комп’ютерного моделювання ливарних процесів LVMFlow [118].

Розробку планування експерименту виконували із застосуванням комп'ютерної програми статистики та графічної візуалізації STATGRAPHICS Plus 5.0 for Windows [119].

Планування експерименту здійснювали з застосуванням методики повного факторного експерименту 2^4 (ПФЕ) [120, 121]. Реалізацію ПФЕ 2^4 виконували в програмі "STATRAPHICS for Windows 5.0". Першим етапом в плануванні було визначення первинних параметрів, здатних вплинути на конструкцію і процес охолодження виливка в кокілі. Експериментальні конструк-

ції кокілю були розроблені в програмі SolidWorks, моделювання процесу заливання і охолодження в програмі LVMFlow. Після завдання первинних чотирьох параметрів: радіатор - "Cooler", маса - "Weigth", складність виробництва - "Production", температура навколишнього середовища - "Temp Environm", програма виводила таблицю з даними, де колонка "Temperature" - експериментальні дані. В колонку "Temperature" вносили дані, отримані в результаті експериментів, проведених, згідно з планом запропонованої програми, ґрунтуючись на чотирьох первинних параметрах.

В результаті запуску програми виводили графіки та діаграми, які наочно демонструють результати впливу кожного фактора окремо і їх комбінацій. Також виводилася підсумкова таблиця, яка резюмувала дані, отримані в результаті оптимізації, а саме, якщо параметр «P-Value» ≤0,05, тоді параметр або комбінація параметрів мали статистично значущі ефекти, вплив інших параметрів був - істотний.

Також в лабораторних умовах із застосуванням ПФЕ 2^4, відповідно до наведеної вище методики, досліджували впливу технологічних параметрів виробництва виливка «Куля» на фізико-механічні і експлуатаційні характеристики. Було реалізовано два ПФЕ 2^4: першим визначали комбінацію параметрів і план експерименту, що надають статистично значимий вплив на твердість виливків, другим - на ударостійкість [122].

Первинні параметри для визначення твердості - колонка з параметром "Hardness" і визначення ударостійкості - колонка з параметром "Hit" (рис.2.6): наявність в сплаві РЗМ - "RZM", температура вибивання з форми - "Temperature", середовище в яке проводилося вибивання (повітря, вода або пісок) - "Environment", температура навколишнього середовища - "Environmental temperature". Експерименти, які були розроблені згідно з планом експерименту, проводили в лабораторних умовах.

Boll.sfx

	BLOCK	RZM	Temperature	Environment	Environmental	Hit
1	1	No	650	Air	15	29
2	1	Yes	650	Air	15	35
3	1	No	800	Air	15	19
4	1	Yes	800	Air	15	39
5	1	No	650	Send	15	30
6	1	Yes	650	Send	15	34
7	1	No	800	Send	15	24
8	1	Yes	800	Send	15	30
9	1	No	650	Air	30	29
10	1	Yes	650	Air	30	35
11	1	No	800	Air	30	19
12	1	Yes	800	Air	30	39
13	1	No	650	Send	30	30
14	1	Yes	650	Send	30	34
15	1	No	800	Send	30	24
16	1	Yes	800	Send	30	30
17						
18						

Рис. 2.6. Введення таблиці параметрів (в колонку Hit внесені експериментальні дані, отримані в результаті реального експерименту)

З метою отримання максимально достовірних результатів експерименту, що проводився, з оптимізації технологічних параметрів виробництва виливка «куля» обробку експериментальних даних, отриманих в «активному» експерименті, проводили за допомогою комплексного показника якості - узагальненої функції бажаності D [123, 124].

Для проведення оптимізації були обрані два показника:

• ударостійкість (кількість ударів вантажу масою 1200 Н з висоти 500 мм до руйнування виливка);

• об'ємна твердість, яку визначали за формулою:

$$Тоб = 0{,}330H_П + 0{,}248H_{35} + 0{,}178H_{30} + 0{,}119H_{25} + 0{,}072H_{20} + \\ +0{,}037H_{15} + 0{,}014H_{10} + 0{,}002H_5 \qquad (2.3)$$

де $H_П$, H_{35}, H_{30}, H_{25}, H_{20}, H_{15}, H_{10}, H_5 - значення твердості HRC на поверхні та на відстанях 35, 30, 25, 20, 15, 10 и 5 мм від центру кулі.

Шкалу бажаності (рис.2.7) будували на основі аналізу літературних даних про фізико-механічні і експлуатаційні властивості подрібнювальних тіл.

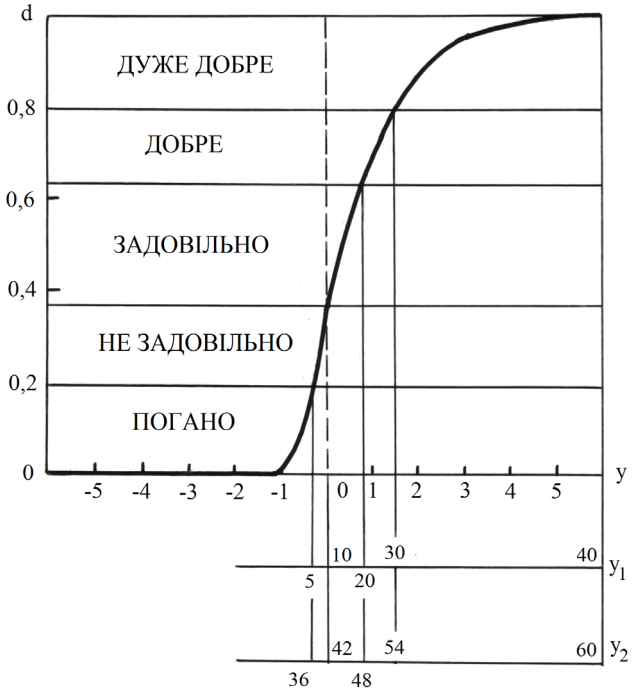


Рис. 2.7. Комплексний показник якості литих куль [20]

Для встановлення термочасових параметрів та визначення оптимальних тимчасових рамок між твердінням основного металу, обробленого комплексним модифікатором, і початком процесу промивки двошарового прокатного валка застосували багатошарові диференційовані за температурними зонами САПР моделі, що дозволило удосконалити технологію лиття двошарового прокатного валка в комбіновану ливарну форму методом промивки [125].

Використання для вирішення поставлених завдань описаних методів дозволило більш глибоко і всебічно вивчити вплив технологічних параметрів на комплекс фізико-механічних і експлуатаційних властивостей модифікованих чавунів і вдосконалити технології одержання високоякісних литих заготовок.

2.11 Висновки за розділом 2:

1. Характер і обсяг експериментальних робіт визначалися поставленими завданнями дослідження. Основним завданням було визначення впливу модифікаторів, що містять РЗМ, на процеси структуроутворення, а також індивідуальне або спільне з термічним обробленням і оптимізацією технологічного процесу виробництва вплив на фізико-механічні та експлуатаційні властивості зносостійких чавунів, що працюють при високих навантаженнях в процесі експлуатації.

2. В процесі виконання поставлених завдань були застосовані стандартні методи: металографічний, хімічний, рентгеноспектральний, визначення механічних властивостей. Крім того, застосовували вдосконалений автором для конкретних умов метод комп’ютерного моделювання. Для встановлення функціональних зв'язків між досліджуваними факторами застосовували обробку експериментальних даних із застосуванням комп'ютерних програм.

3. Всі дослідження проводили з використанням сертифікованих приладів та методів дослідження та контролю якості придатного литва при здавальному контролі.

Матеріали розділу опубліковано у [20, 30, 31, 122, 125]

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА І ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЛИТТЯ ВИЛИВКІВ З НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ МОДИФІКОВАНИХ ЧАВУНІВ

3.1 Способи виготовлення куль

Нині найбільш поширеними методами виготовлення куль є: прокатування, кування, лиття в піщану форму, кокільне лиття та ін.

Лиття куль в піщану форму має невелику вартість, проте для підвищення їх міцності необхідно вводити дорогі легуючі хімічні елементи. До того ж при масовому виробництві виливків такого типу необхідно використовувати формувальні лінії, бажано автоматичні.

У виготовленні куль методом кокільного лиття є такі основні переваги, як можливість легкої автоматизації процесу лиття і більше екологічний метод порівняно з іншими. До недоліків відносяться: велика вартість кокілю і необхідність суворого дотримання технологічного процесу. У сучасному виробництві литих чавунних куль використовують і кокільне лиття, і лиття у піщану форму.

Завданням цього розділу дисертаційної роботи було удосконалення технологічного процесу масового виготовлення литих куль без ливарних дефектів.

На першому етапі в роботі були проаналізовані дві промислові технології виготовлення куль (рис. 3.1), які застосовували на ПАТ «АвтоКраз» для виготовлення куль діаметром від 40 до 100 мм. При литті в піщану форму виливки отримували за допомогою трьох стрижнів, два з яких були однаковими (рис. 3.2). Для виготовлення виливків застосовували два комплекти стрижневих ящиків нескладної конструкції: один для виливків середнього ряду (з живильником), а інші - для верхнього і нижнього рядів. Стержні виготовляли на автоматичних і напівавтоматичних стрижневих машинах.

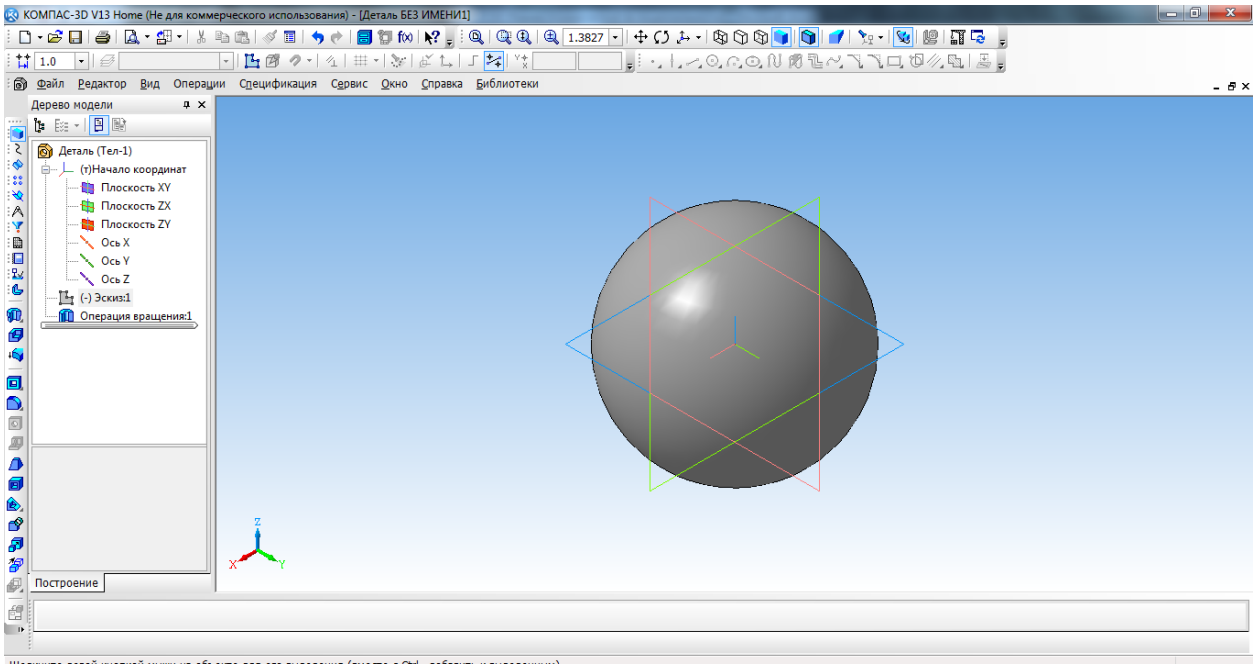


Рис. 3.1. Ескіз дослідного виливка «куля»

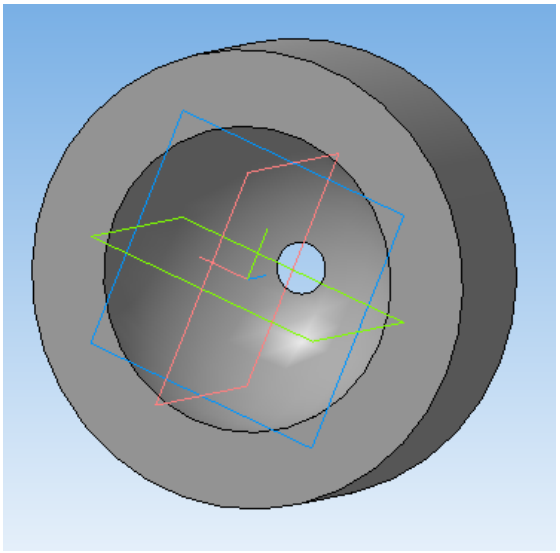


Рис. 3.2. Ливарний стрижень

Формування здійснювали в опоках розмірами 600х500х150/150 мм із застосуванням універсальних модельних плит на формувальній лінії з використанням струшувальних з допресуванням формувальних машин. Кожну модельну плиту використовували для різних розмірів куль за рахунок зміни

формотворних поверхонь виливка при одночасному збереженні зовнішніх розмірів стрижня.

Литтям в кокіль отримували виливки на механізованому конвеєрі. Складання і розбирання чотиримісних кокілів (рис. 3.3) здійснювали за допомогою крану. Для безпечної роботи кокіль мав зміщений вниз центр тяжіння (рис. 3.4).

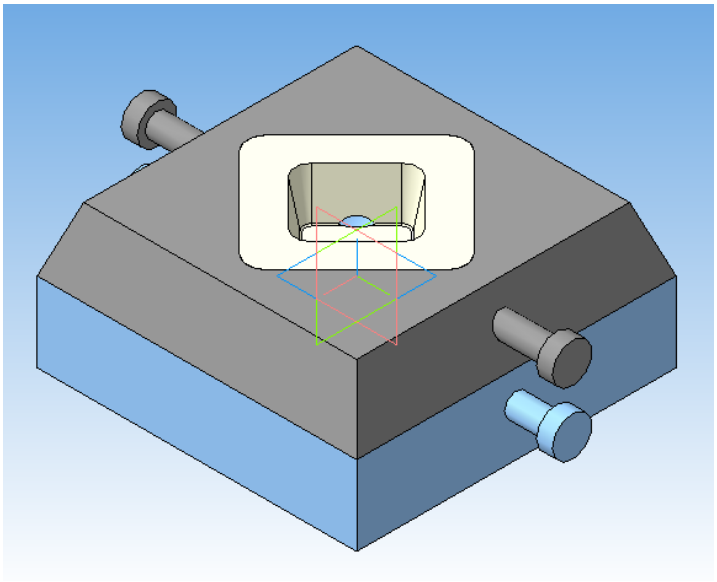


Рис. 3.3. Кокільна форма

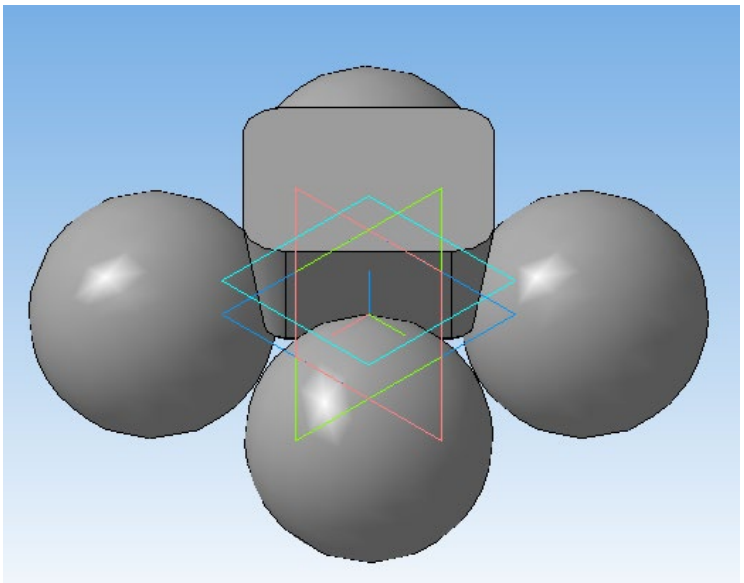


Рис. 3.4. Складення виливків

3.2 Моделювання промислових технологій лиття чавунних куль

При виготовленні виливків способом лиття в піщану форму в одній формі розміщували 36 виливків (рис.3.5), металоємність форми була 31,7 кг: маса одного виливка 0,814 кг, а витрати рідкого розплаву на один виливок - 0,88 кг (7,5% маса ливникової системи).

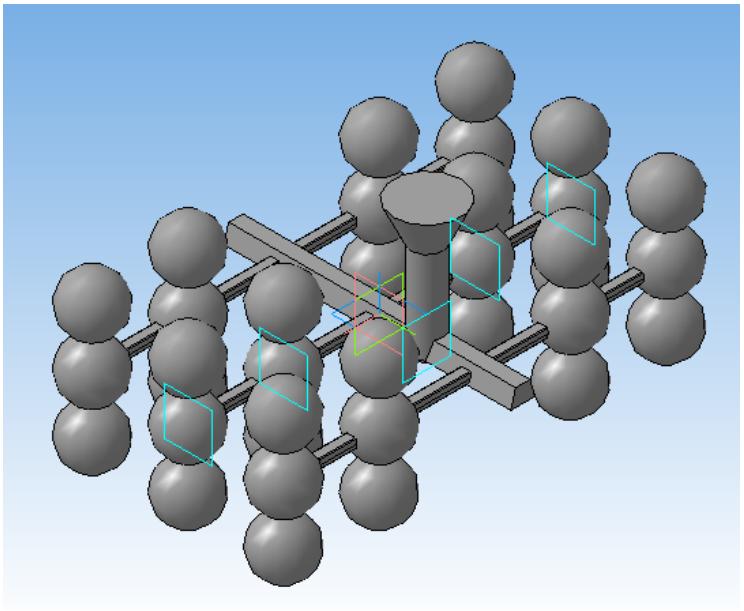


Рис. 3.5. Складення виливків

Моделювання процесу заливання і кристалізації виливків показало, що ливарні дефекти були в тілі усіх виливків (рис. 3.6). Причиною їх утворення було використання горизонтальної ливникової системи, при цьому середній ряд виливків розігрівався сильніше і твердів в останню чергу (рис. 3.7), а верхній ряд виконував функцію надливу.

В результаті верхній ряд виливків був бракований через великі усадкові раковини в їх тілі, а нижній і середній ряди виливків за узгодженням із замовником можна було використовувати як придатні.

При виготовленні виливків способом кокільного лиття металоємність форми (див. рис. 3.4) складала 3,9 кг рідкого чавуну: маса одного виливка

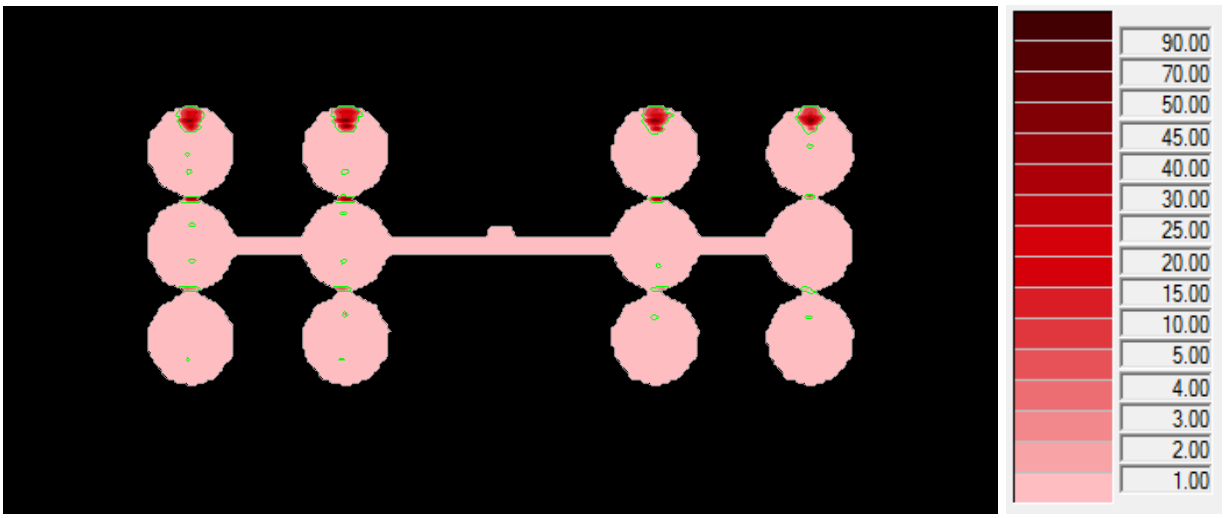


Рис. 3.6. Ливарні дефекти у виливках

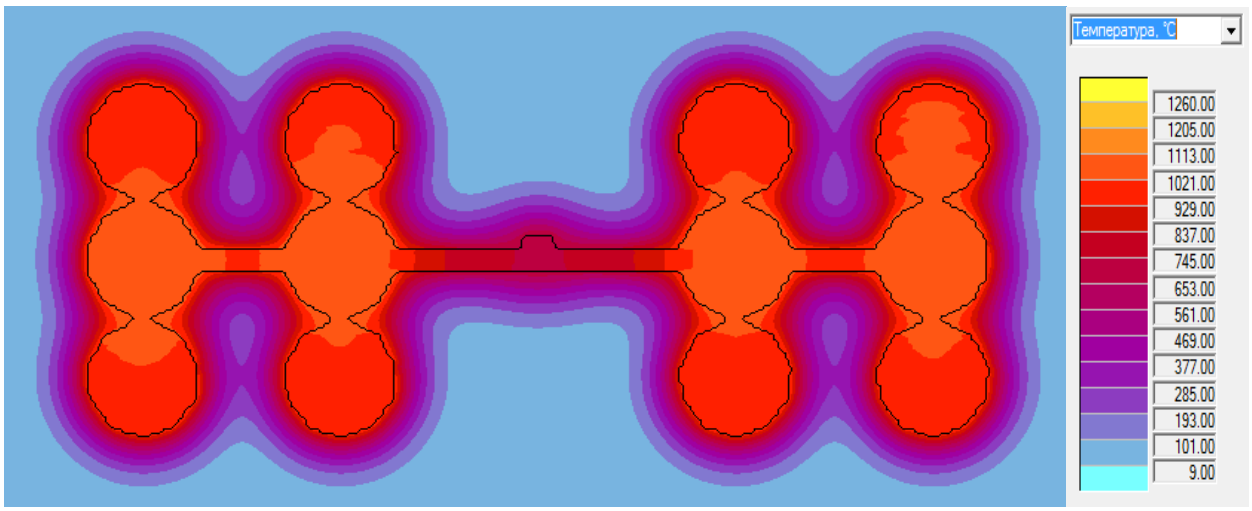


Рис. 3.7. Температура виливків і форми при кристалізації

була 0,814 кг, а витрати рідкого розплаву на один виливок - 0,975 кг (16,5% маса ливникової системи).

Моделювання проводили за таких умов:

– кокіль сталевий (35ГЛ), перед заливанням розігрітий до температури 250ºС; стрижень виготовлений з холоднотвердіючої суміші, його температура 20ºС; температура чавуну при заливанні - 1270ºС.

Моделювання показало, що ливарних дефектів в тілі виливків не було (рис. 3.8). Проте така технологія мала недолік – дуже масивний живильник у

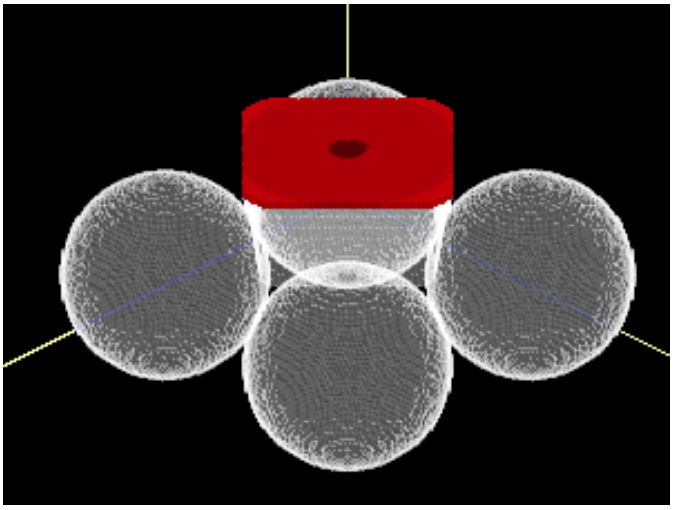


Рис. 3.8. Ливарні дефекти в складенні виливків

вигляді еліпсу з розмірами: довжина-16, ширина і висота-5,5 мм, який при кристалізації залишався в рідкому стані до повної кристалізації виливків (рис. 3.9), а після охолодження їх при відділенні від живильника в галтувальному барабані відбувався відрив частини кулі і виходило так зване кулясте тіло.

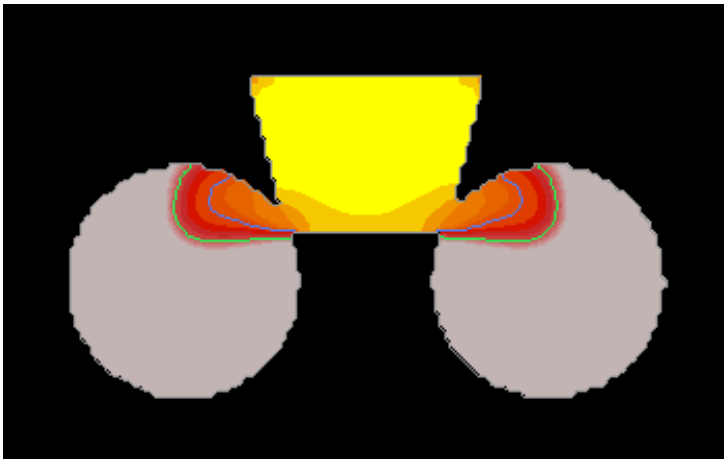


Рис. 3.9. Рідка фаза

3.3 Дослідження впливу модифікування на структуру дослідних литих куль

У роботі був проведений порівняльний аналіз мікроструктури чавунів стандартного хімічного складу, вживаного в серійному виробництві, і модифікованого рідкоземельними металами.

Для виробництва куль застосовували нелегований залізовуглецевий сплав (табл. 3.1). Плавку проводили в індукційній печі моделі ИЛТ-2,5. В якості модифікатора використовували комплексний модифікатор СРЗМ30 (ТУ 14-5-136-81) наступного хімічного складу, мас.%: РЗМ 40, кремній 39,6, алюміній 5,9, залізо – решта.

Таблиця 3.1

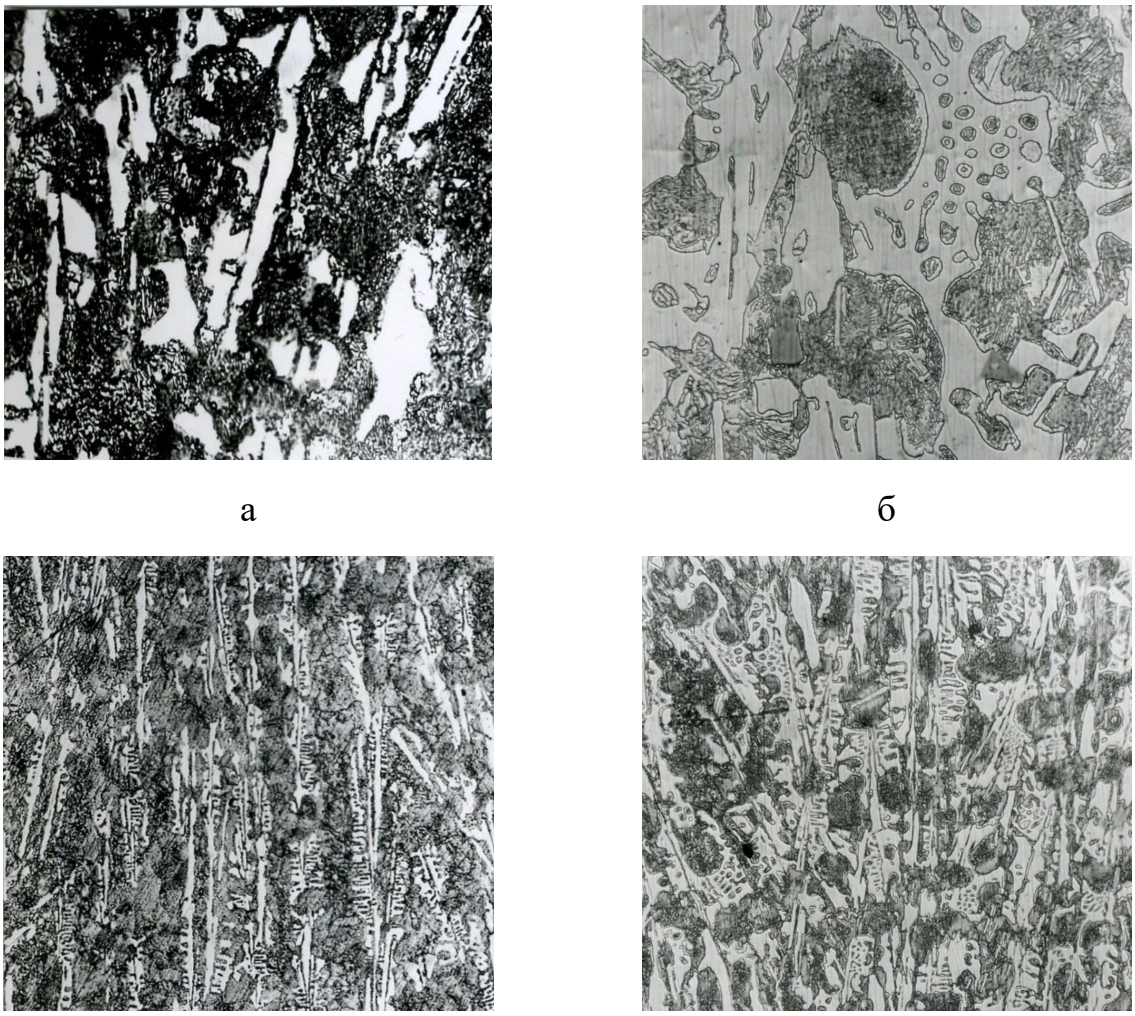
Хімічний склад дослідних виливків [20]

Назва дослідної партії	Зміст хімічних елементів, мас.%						
	C	Si	Mn	P	S	ΣРЗМ	Fe
Серійного виробництва	3,47	1,14	0,31	0,09	0,15	-	решта
Дослідна	3,45	1,12	0,30	0,08	0,10	0,03	решта

Модифікування проводили в розливних ковшах місткістю 0,12 т. Заливання кокільних ливарних форм здійснювали при температурі розплаву 1280…1300ºС. Ливарна кокільна форма була з симетричним вертикальним роз'ємом, що утворював порожнину для отримання трьох куль діаметром 80мм. Температура кокільних форм перед заливанням витримували в межах 110….160°С, щоб уникнути ливарного дефекту - «відхід металу».

Тривалість витримки металу у формі до вибивання розраховували з допомогою CAM систем комп'ютерного моделювання ливарних процесів SolidWorks і LVMFlow.

Виливки – кулі із немодифікованого сплаву серійного виробництва мали структуру білого доевтектичного чавуну (рис. 3.10). Евтектичне перетворення



а б

в г

Рис.3.10 - Мікроструктура чавуну: а, б – серійного виробництва; в, г – дослідна партія; а, в –150^{x}; б, г –500^{x}

відбувалося з утворенням стільникового ледебуриту і грубого конгломерату фаз, а евтектоїдне - з утворенням пластинчатого перліту з феритною анормальною облямівкою. Застосування комплексного модифікатора на основі РЗМ сприяло зменшенню кількості карбідної складової, що виділялася у вигляді евтектичних пластин. Перліт був щільніше, троостітоподібну будову, анормальна феритна облямівка була відсутня. Таким чином, модифікування чинило сприятливий вплив на мікроструктуру таких виливків як куля [126].

3.4 Вдосконалення хімічних складів та властивостей виливків куль

В ході роботи за визначенням впливу хімічних елементів на властивості чавунів для литих куль були проведені дві серії досліджень з розробки різних складів чавуну.

Вплив окремих елементів на структуру і властивості чавуну дуже різноманітний, і так само є багато додаткових факторів, які можуть змінювати вплив того або іншого елементу. Змінний якісний і кількісний вплив різних елементів на структуроутворення сплавів ускладнює можливість їхньої класифікації за ознакою інтенсивності цього впливу, тим більше, що в багатьох випадках, наявність у сплаві двох карбідоутворюючих елементів не обов'язково посилює їх окремий вплив, а іноді нівелює його. Тому задача з підбирання легуючого комплексу, зводилася до того, щоб нейтралізувати небажаний вплив окремих елементів і посилити їх спільний вплив [127].

Перша серія експериментів з удосконалення хімічного складу матеріалу куль з метою одержання БЧ з високими показниками міцності та ударостійкості. За цього в нелегований чавун вводили церій, лантан та гафній при наступному співвідношенні компонентів, мас.%: вуглець 2,8…3,5; кремній 1,1…2,50; марганець 0,5…0,8; фосфор 0,3…0,8; церій 0,10…0,15; лантан 0,08…0,10; гафній 0,05…0,10; залізо – решта [128].

При встановленні необхідної кількості РЗМ в чавуні ураховували наступне.

Для подавлення виділення ледебуритної евтектики у чавуні та підвищення властивостей було прийнято до уваги, що ці модифікатори значною мірою відрізняються один від одного за хімічною активністю, модифікуючим впливом, мають різні температури плавлення, кипіння, теплоти утворення сполук та енергії Гібса. Однозначно встановлено, що, наприклад, максимальну мікротвердість цементиту та перліту дозволяє одержати модифікування лантаном, а фериту – модифікування церієм. Механізм такого впливу на теперішній час вивчено недостатньо. Комплексне модифікування вказаними

модифікаторами призводить до переважного утворення оксиду CeO_2, енергія Гібса котрого значно нижча, ніж у оксидів La_2O_3. Таким чином, ураховуючи вищевикладене, встановили нижні границі вмісту вказаних елементів, що забезпечує подавлення виділення ледебуритної евтектики та перетворення її в пластиноподібну. За нашими даними нижні границі концентрацій модифікаторів повинні бути такими, мас.%: церій – 0,1, лантан – 0,08. Зменшення концентрацій модифікаторів (будь-якого з вказаних) нижче за границі, що рекомендуються, не дозволяє повністю одержати пластиноподібну евтектику, у структурі присутній ледебурит, який призводить до зниження міцності та ударостійкості. Верхні границі концентрацій лантану визначали зі ступенем зростання мікротвердості карбідної фази. При концентраціях 0,1% лантану мікротвердість карбідної фази була максимальною. Подальше збільшення вмісту цього елементу призводило до утворення великої кількості неметалевих включень, які зменшували міцність чавуну. Ураховуючи, що церій у першу чергу витрачається на рафінування розплаву розраховували максимально необхідні його вмісти, а потім за ступенем зростання мікротвердості матриці визначали максимальну його концентрацію. При вмістах 0,15% церію (в комплексі з 0,1% лантану) мікротвердість матриці була максимальною. Подальше збільшення концентрацій вказаних елементів не призводило до підвищення мікротвердості. Слід відмітити, що ступінь модифікуючого впливу індивідуальних елементів-модифікаторів, що розглянуто, значною мірою зростає при комплексному використанні та у більшості випадків модифікування індивідуальним елементом-модифікатором не дозволяє досягти результатів, що були одержані при комплексному модифікуванню. Механізм такого взаємного впливу у технічній літературі практично не описаний.

Гафній у запропонованому чавуні виявляє перлітоутворюючий вплив на структуру металевої матриці та підвищує дисперсність перліту, за цього збільшуються показники міцності та ударостійкості. При вмістах гафнію менше за 0,05% цей вплив незначний, підвищення ж вмісту вище за 0,1% призводить к зменшенню міцностних властивостей.

Чавун базового сплаву та експериментальні плавки проводили в індукційній печі з кислою футеровкою, вага шихти 40 кг.

Були застосовані наступні шихтові матеріали: чавун переробний ПВК1, ПВК2, ПВК3 ДСТУ 3133-95; чавун ливарний Л1, Л2 ДСТУ 3132-95; брухт сталі 1А, 2А, 3А ГОСТ 2787-75; феросиліцій ФС75 ГОСТ 1415-91; феромарганець ФМн78, ФМн70 ДСТУ 3547-97.

Після розплавлення шихти потужність печі знижували до 30-40% від максимальної, зчищували шлак періоду плавлення, заміряли температуру та вводили гафній у вигляді гафнієвої лігатури такого складу, мас.%: гафній 90, залізо решта. Модифікування робили таким чином: модифікувальні елементи (церій, лантан) вводили у ківш перед випуском металу у вигляді лантан-церієвої лігатури такого складу, мас.%: лантан 8…10; церій 10…15; вуглець 0,3…0,5; кальцій 0,4…0,5; кремній 40…45; залізо решта. При температурі $1500 \pm 5^{o}C$ чавун випускали у ківш з необхідною наважкою модифікаторів та при досягненні температури 1330…1340^{o}C заливали у кокільні форми. Виливки мали розміри: 1) куля діаметром 60 мм, 2) циліндр діаметром 50 мм та висотою 200 мм. З цих виливків вирізали зразки для хімічного аналізу, металографічних досліджень, випробування границі міцності при розтягу та ударостійкості. Випробування границі міцності при розтягу проводили за стандартним методом. Випробування ударостійкості проводили за кількістю ударів до руйнування литої кулі при падінні її з висоти 6 м. Хімічний аналіз та властивості запропонованого чавуну та прототипу наведені у таблиці.

В результаті лабораторних досліджень встановили, що експериментальний чавун мав істотно підвищену дисперсність структурних складових. Ударостійкість модифікованого чавуну у порівнянні з базовим підвищилася на 10…14, а міцність $\sigma_в$ – на 3…4,5% [129] (табл. 3.2).

Другу серію вдосконалення складу чавуну для лиття куль проводили з метою одержання зносостійкого чавуну з високими показниками міцності та ударостійкості.

Таблиця 3.2

Узагальнені дані по випробуванню дослідних чавунів [122]

Номер плавки	Зміст хімічних елементів в чавуні, %							Властивості чавуну	
	C	Si	Mn	Ce	La	Hf	Fe	$\sigma_в$, МПа	Ударостійкість, разів
1	2,8	1,1	0,5	0,10	0,08	0,05	решта	685	2590
2	3,5	2,5	0,8	0,15	0,10	0,10	«	690	2680
3	3,15	1,8	0,65	0,13	0,09	0,075	«	680	2635
4	3,5	2,5	0,65	0,18	0,09	-	«	660	2300
5	3,8	2,0	0,8	0,16	0,10	-	«	660	2400

За цього в базовий чавун, що містить вуглець, кремній, марганець, нікель, ніобій, титан, церій, ітрій лантан неодим та залізо [130] додавали при наступному співвідношенні компонентів, мас.%: вуглець 3,5…4,2; кремній 1,2…1,8; марганець 2,5…4,0; нікель 1,5…2,5; ніобій 0,05…0,1; титан 0,2-0,25; церій 0,06…0,1; ітрій 0,06…0,1; лантан 0,04…0,08; неодим 0,04…0,08; гафній 0,02…0,08; залізо – решта [131].

Вміст хімічних елементів у чавуні обґрунтовувався наступним:

– вуглець є основним зміцнювачем залізовуглецевих сплавів і відповідно при концентраціях у межах 3,5 - 4,2% забезпечує мартенситну структуру і підвищену зносостійкість чавуну. Верхня практична границя вмісту вуглецю у більшості випадків обумовлюється евтектичним складом, тому що при більш високому вмісті вуглецю з’являються надлишкова карбідна фаза (первинний цементит), що відповідно приводить до окрихчування чавуну і зросту зносу. При вмісту вуглецю менше нижньої границі, що рекомендується, значно зменшується кількість карбідної фази, що приводить до зниження твердості й, як наслідок, зносостійкості;

– кремній в обраних границях нейтралізує карбідизуючу дію марганцю, тобто забезпечує одержання необхідного ступеня графітизації чавуну (Кг). При зменшенні вмісту кремнію нижче 1,2% параметр графітизації чавуну Кг низький, а тому такий чавун має недостатню міцність. Збільшення вмісту кремнію вище верхньої границі, що рекомендується, не дозволяє одержати білий без графітний чавун;

– марганець; найбільші міцність та зносостійкість білих чавунів з пластинчастою евтектикою й високотвердими спеціальними карбідами ніобію можуть бути досягнуті тільки на разі, якщо вони знаходяться у твердій і міцній матриці. В новому чавуні для одержання мартенситної матриці передбачається легування марганцем у границях 2,6-4,0% в комбінації з 1,5-2,5 нікелю. Зменшення концентрації марганцю нижче 2,5% не дозволить одержати мартенситну матрицю, у структурі буде присутнім тростит, що зменшує зносостійкість. Підвищення вмісту марганцю більше за 4,0% не призводить до подальшого поліпшення властивостей;

– нікель; границі вмісту нікелю обрано виходячи з необхідності одержання мартенситної матриці. Нижня границя вмісту нікелю, що забезпечує в комбінації з 2,5-4,0% марганцю одержання мартенситної матриці складає 1,5%. Оптимальну міцність та зносостійкість забезпечує легування 2,5% нікелю. Підвищення концентрації нікелю більше за 2,5% до значного збільшення властивостей не призводить, а собівартість такого чавуну зростає значно;

– у запропонованому чавуні однією з причин підвищення зносостійкості є утворення високо твердих спеціальних карбідів найсприятливішої форми. Досягається це сумісним введенням ніобію та титану. За нашими даними оптимальним вмістом ніобію є 0,05-0,10%. При вмісті ніобію менше за 0,05% в комплексі з 0,15-0,20% титану кількість карбідів ніобію мала й зносостійкість таких чавунів менше оптимальної. Підвищення ж вмісту ніобію вище за 0,10% (при 0,20-0,25% титану) не призводить до подальшого збільшення зносостійкості;

– роль титану у запропонованому чавуні подвійна: утворення дисперсних високо твердих карбідів титану та зміна на більш сприятливу форми карбідів ніобію. Найбільш високі значення зносостійкості досягаються при концентраціях титану 0,20-0,25% та наявності 0,05-0,10% ніобію. При вмісті титану менше за 0,20% зносостійкість чавуну значно зменшується, а збільшення його концентрацій понад 0,25% не призводить до подальшого росту зносостійкості;

– при виборі модифікаторів для подавлення виділення ледебуриту у білому чавуні та підвищення властивостей було прийнято до уваги, що відомі модифікатори (церій, ітрій, лантан, неодим) значною мірою відрізняються один від одного за хімічною активністю, модифікуючим впливом, мають різні температури плавлення, кипіння, теплоти утворення сполук та енергії Гібса. Однозначно встановлено, що, наприклад, максимальну мікротвердість цементиту та перліту дозволяє одержати модифікування ітрієм та лантаном, а фериту – модифікування церієм та неодимом. Механізм такого впливу в теперішній час вивчено недостатньо. Комплексне модифікування вказаними модифікаторами призводить до переважному утворенню CeO_2, енергія Гібса котрого значно нижче, ніж у La_2O_3 та Y_2O_3. Таким чином, ураховуючи вищевикладене, встановили нижні границі вмісту вказаних елементів, що забезпечує подавлення виділення ледебуритної евтектики та перетворення її в пластиноподібну. За нашими даними нижні границі концентрацій модифікаторів повинні бути такими, мас.%: церій – 0,06, ітрій – 0,06, лантан – 0,04, неодим – 0,04. Зменшення концентрацій модифікаторів (будь-якого з вказаних) нижче за границі, що рекомендуються, не дозволяє повністю одержати пластиноподібну евтектику, у структурі присутній ледебурит, який призводить до зниження зносостійкості. Верхні границі концентрацій ітрію та лантану визначали зі ступенем зростання мікротвердості карбідної фази. При концентраціях 0,1% ітрію та 0,08% лантану мікротвердість карбідної фази була максимальною. Подальше збільшення вмісту цих елементів призводило до утворення великої кількості неметалевих включень, які зменшували зносостій-

кість. Ураховуючи, що церій у першу чергу витрачається на рафінування розплаву розраховували максимально необхідні його вмісти, а потім за ступенем зростання мікротвердості матриці визначали максимальну його концентрацію. Верхня границя неодиму також визначали за ступенем зростання мікротвердості матриці. При вмістах 0,1% церію та 0,08% неодиму (в комплексі з 0,1% ітрію та 0,08% лантану) мікротвердість матриці була максимальною. Подальше збільшення концентрацій вказаних елементів не призводило до підвищення мікротвердості та, як слідство, зносостійкості. Слід відмітити, що ступінь модифікуючого впливу індивідуальних елементів-модифікаторів, що розглянуто, значною мірою зростає при комплексному використанні та у більшості випадків модифікування індивідуальним елементом-модифікатором не дозволяє досягти результатів, що були одержані при комплексному модифікуванню. Механізм такого взаємного впливу у технічній літературі практично не описаний;

– гафній у запропонованому чавуні виявляє перлітоутворюючий вплив на структуру металевої матриці та підвищує дисперсність перліту, за цього збільшуються показники міцності та ударостійкості [129].

Для оцінки властивостей, запропонованого чавуну і його структурного стану, у порівнянні із базовим, отримали експериментальний чавун.

Були застосовані наступні шихтові матеріали: чавун переробний ПВК1, ПВК2, ПВК3 ДСТУ 3133-95; чавун ливарний Л1, Л2 ДСТУ 3132-95; чавун валковий ЧВ-1, ЧВ-2 ГОСТ 1465-80; лом сталі 1А, 2А, 3А ГОСТ 2787-75; феросиліцій ФС75 ГОСТ 1415-91; феромарганець ФМн78, ФМн70 ДСТУ 3547-97. Легувальні елементи відповідали таким параметрам: феротитан ФТи30 ГОСТ 4761-91; фероніобій ФНб60 ГОСТ 4765-91.

Експериментальні плавки проводили в індукційній печі з кислою футеровкою, вага шихти 40 кг. Після розплавлення шихти потужність печі знижували до 30-40% від максимальної, зчищували шлак періоду плавлення, замірялі температуру та вводили гафній у вигляді гафнієвої лігатури такого

складу, мас.%: гафній 90, залізо решта. При доводці сплаву при температурі металу 1520 - 1530^{0}С вводили феросплави ніобію та титану.

Модифікування робили таким чином: модифікувальні елементи (церій, ітрій, лантан, неодим) вводили у ківш перед випуском металу у вигляді ітрій-церієвої та лантан-неодимової лігатур такого складу, мас.%:

1) ітрій 15…20	2) лантан 15…20
церій 15…20	неодим 15…20
вуглець 0,3…0,5	вуглець 0,3…0,5
кальцій 0,4…0,5	кальцій 0,4…0,5
кремній 30…35	кремній 30…35
Залізо решта,	залізо решта.

При температурі 1500 ± 5ºС чавун випускали у ківш з необхідною наважкою модифікаторів та при досягненні температури 1330…1340ºС заливали у кокільні форми. Виливки мали розміри: 1) куля діаметром 60 мм, 2) циліндр діаметром 50 мм, висотою 200 мм. З цих виливків вирізали зразки для хімічного аналізу, металографічних досліджень, випробування границі міцності при розтягу, ударостійкості та зносостійкості. Випробування границі міцності при розтягу проводили за стандартним методом. Випробування ударостійкості проводили за кількістю ударів до руйнування литої кулі при падінні її з висоти 6 м. Зносостійкість сплаву визначали на установці СМЦ-2 при терті ковзання з зусиллям 700 МПа. Мікротвердість вимірювали на приладі ПМТ-3 при навантаженні 500 Н. Хімічний аналіз та властивості запропонованого чавуну та базового наведені у табл. 3.3.

Експериментальний чавун мав у структурі підвищену дисперсність перліту та пластинчастої карбідної фази, а також велику кількість високотвердих спеціальних карбідів, що дозволило підвищити ударостійкість, міцність та зносостійкість [**131**].

Таблиця 3.3

Хімічний склад і властивості запропонованого та базового чавуну

Сплав	№ вар	Хімічний склад, мас.%											Властивості			
		C	Si	Mn	Ni	Nb	Ti	Ce	Y	La	Nd	Hf	Ударостій-кість, разів	Зносо-стійкість, г	σ_B, МПа	Мікро-твердість матриці, МПа
Чавун, що пропо-нується	1	3,5	1,2	2,5	1,5	0,05	0,20	0,06	0,06	0,04	0,04	0,02	2590	0,018	685	9320
	2	4,2	1,8	4,0	2,5	0,10	0,25	0,10	0,10	0,08	0,08	0,08	2680	0,017	690	9650
	3	3,9	1,4	3,3	2,0	0,08	0,23	0,08	0,08	0,06	0,06	0,05	2635	0,016	680	9560
	4	3,8	1,42	3,3	2,1	0,02	0,23	0,08	0,078	0,06	0,065	0,01	2300	0,022	660	9260
	5	3,8	1,4	3,3	2,0	0,15	0,23	0,08	0,08	0,063	0,06	0,09	2400	0,014	660	9450
Чавун базо-вий	6	3,5	1,2	2,5	1,5	0,05	0,20	0,06	0,06	0,04	0,04	-	2365	0,018	655	9200
	7	4,2	1,8	4,0	2,5	0,10	0,25	0,10	0,10	0,08	0,08	-	2400	0,016	668	9550
	8	3,9	1,4	3,3	2,0	0,08	0,23	0,08	0,08	0,06	0,06	-	2350	0,015	660	9400

3.5 Вдосконалення технологічного процесу кокільного лиття куль

Для виробництва чавунних куль діаметром 80 мм був прийнятий високопродуктивний, широко поширений метод лиття у багаторазові металеві форми на установці карусельного типу, що дозволяє отримати вироби високої якості.

Сьогодні існують різні модифікації ліній безперервного кокільного лиття куль, виходячи з цього, для серійного виробництва куль з білого модифікованого чавуну, за оптимізованою технологією може застосовуватися та, яка відповідає наступним технологічним вимогам:

- Фарбування кокілів;
- Безперервна подача ливарних форм під заливання;
- Дозоване заливання металу;
- Регулювання об'єму заповнення форм, з можливістю зливу надмірного металу;
- Охолодження виливків, що кристалізуються;
- Видалення куль з кокілів;
- Очищення від ливників і сортування виливків.

Креслення виливка, на підставі якого проводилися дослідження, з елементами ливарної форми, наведено в додатку А.

- У ливарній формі розташовували 3 виливки;
- Товщина стінки кокілю повинна відповідати наступній залежності: $d_ш/2 \leq l_ф$, для комп'ютерного моделювання процесу лиття була прийнята товщина стінки кокілю $l_ф$ =40мм;
- Температура кокілю перед заливанням 150°С;
- Тривалість заливання, при температурі заливання 1380°С, розраховано в модулі «Повне завдання» LVMFlow і складає 0,77сек;
- Тривалість охолодження виливка в кокільній формі до температури 730-800°С була розрахована в модулі «Повне завдання» LVMFlow і складає 1мин 24,7сек;

- Діаметр ливника 20 мм.

В результаті комп'ютерного моделювання визначено, що обраний переріз ливника дозволяє забезпечити достатню швидкість заповнення ливарної порожнини, при цьому, не викликає додаткових витрат при очищенні литва при виконанні живильника у вигляді легко відокремлюваного перешийка (додаток А). З аналізу температурних полів, отриманих за допомогою комп'ютерного моделювання в процесі заповнення ливарної порожнини, видно, що ливник не перемерзав. Швидкість заповнення форми до 100% для усіх варіантів технологічних рішень, складає - 0,77 с.

- Для комп'ютерного моделювання розрахункове поле ливарної форми і порожнини в ній поділяються на осередки. Чим менше переріз осередку, тим вище точність моделювання і відповідно витрати часу на його проведення. Розмір осередку, вживаний в процесі моделювання, складав 5мм.

Для визначення найбільш ефективної конструкції кокілю і дослідження процесу кристалізації в ньому, було розроблено дев'ять технологічних рішень (ТР). За основу була прийнята конструкція кокілю з трьома порожнинами для отримання виливків (міжцентрова відстань між порожнинами для усіх ТР мало єдине значення – 130 мм (додаток Б)). Планування експерименту виконували за допомогою повного факторного експерименту, реалізованого за допомогою комп'ютерної програми STATGRAPHICS plus 5.0.

Після того, як були визначені основні первинні параметри: наявність радіатору, маса кокілю, складність виготовлення кокілю, температура довкілля, здатність діяти на швидкість охолодження кокілю були розроблені наступні технологічні рішення. Комбінації параметрів і план експерименту представлені на рис. 3.11. На підставі отриманих результатів, згідно з планом експерименту, було розроблено чотири технологічних рішення, що покривали необхідні параметри для внесення цільової змінної в стовпець - температура "Temperature"(див. рис. 3.11). Проте понад план досліджували додатково ще 5 технологічних рішень з різними комбінаціями радіатору і модифікаціями кокілю для отримання ширшої картини експериментальних даних :

Temperature.sfx

	BLOCK	Cooler	Weigth	Production	Temp Environm	Temperature
1	1	No	25000	No	15	982
2	1	Yes	25000	No	15	798
3	1	No	42000	No	15	780
4	1	Yes	42000	No	15	783
5	1	No	25000	Yes	15	982
6	1	Yes	25000	Yes	15	798
7	1	No	42000	Yes	15	780
8	1	Yes	42000	Yes	15	783
9	1	No	25000	No	30	982
10	1	Yes	25000	No	30	798
11	1	No	42000	No	30	780
12	1	Yes	42000	No	30	783
13	1	No	25000	Yes	30	982
14	1	Yes	25000	Yes	30	798
15	1	No	42000	Yes	30	780
16	1	Yes	42000	Yes	30	783
17						

Рис. 3.11 – Таблиця плану експерименту із заповненим стовпцем "Temperature" згідно експериментальних даних

ТР№1 - найбільш часто вживана, загальноприйнята конструкція кокілю з товщиною стінки, рівною 40 мм, що відповідає залежності dш/2≤ lф. Форма кокілю прямокутна з вертикальним роз'ємом по осі виливка (рис.3.12, а);

ТР№2 - товщина кокілю навколо кулі дорівнює 20 мм і повторює його форму нижче за горизонтальну вісь кулі, вище за горизонтальну вісь тіло кокілю має форму витягнутого бобишка з діаметром 120 мм. У верхній частині кокілю розташований прямокутний бобишок завтовшки 25 мм з габаритними розмірами по периметру як в ТР№1. На вертикальній осі кулі, що є лінією роз'єму кокілю, також розташований прямокутний бобишок завтовшки 5 мм з габаритними розмірами по периметру як в ТР№1. По перпендикулярній лінії роз'єму вертикальної осі кулі виконано три ребра, які збільшують жорсткість і технологічність конструкції. Від бобишка у верхній частині кокілю до нижньої частини кокілю з рівним кроком виконано дев'ять ребер (радіатор), що повторюють утворену описаними раніше елементами форму кокілю (рис.3.12, б).

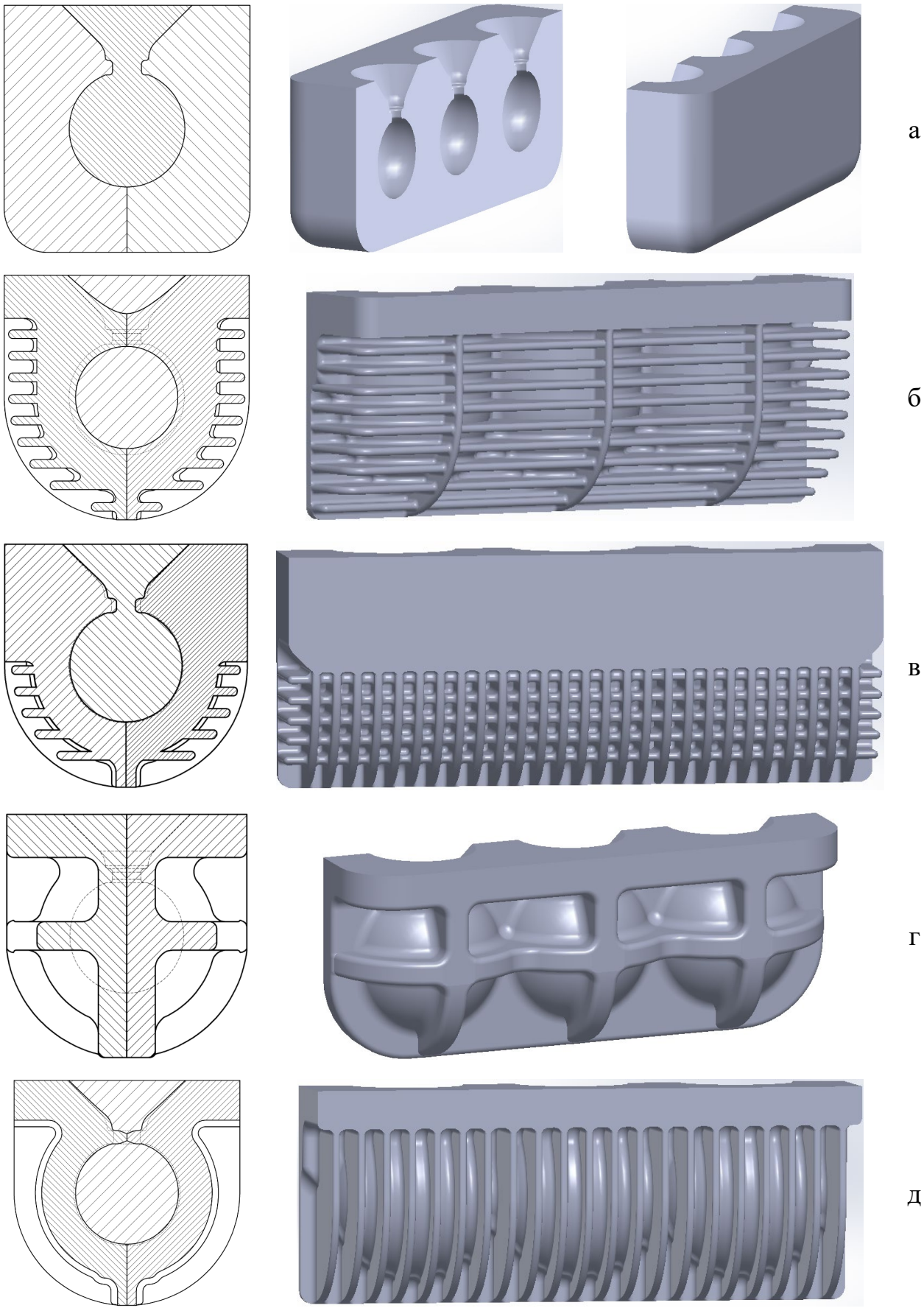


Рис.3.12 - Технологічні рішення:

а - ТР №1, б - ТР №2, в - ТР №3, г - ТР№4, д - ТР № 5

ТР№3 - основа конструкції кокілю така ж, як і в ТР№2, відмінністю є наявність масивнішого бобишка у верхній частині кокілю, який починається з горизонтальної осьової лінії кулі, а також замість поперечних ребер жорсткості, разом з п'ятьма горизонтальними ребрами, виконано 27 ребер, які утворюють між собою порожнисті осередки (рис. 3.12, в).

ТР№4 - на відміну від ТР№2 тіло кокілю завтовшки 20 мм повторює форму кулі і ливника не лише нижче за горизонтальну осьову лінію кулі, але і вище за неї. На вертикальній осі кулі, що є лінією роз'єму кокілю, товщина бобишка складає 20 мм для отримання міцнішої конструкції кокілю з причини відсутності радіатора. На горизонтальній і вертикальній, перпендикулярній лінії роз'єму, осі кулі виконані ребра, що повторюють форму кокілю навколо кулі, завтовшки 20 мм (рис. 3.12, г).

ТР№5 - основа конструкції кокілю така ж, як в ТР№2. Тіло кокілю завтовшки 20 мм повторює форму кулі і ливника вище і нижче за горизонтальну осьову лінію кулі. Відсутні горизонтальні ребра, при цьому виконано 21 ребро (радіатор) на вертикальній площині, яка перпендикулярна лінії роз'єму (рис. 3.12, д).

ТР№6 - повний аналог ТР№5, відмінністю є тільки форма кокілю навколо кулі, яка як в ТР№2 повторює його форму нижче за горизонтальну вісь кулі; а вище за горизонтальну вісь тіло кокілю має форму витягнутого бобишка діаметром 120 мм (рис.3.13 а).

ТР№7 - основа конструкції як в ТР№3. Горизонтальні ребра відсутні, виключення торцеві частини кокілю, в яких горизонтальні ребра є елементом, що посилює конструкцію, в тій частині кокілю, яка схильна до можливих ушкоджень. ТР №7 розроблене на основі ТР№5 і ТР№6, метою якого є організація простору для установки екзотермічної вставки. ТР№7 має менший крок між ребрами охолоджувача, і як наслідок, більшу кількість ребер - 27шт (рис. 3.13 б).

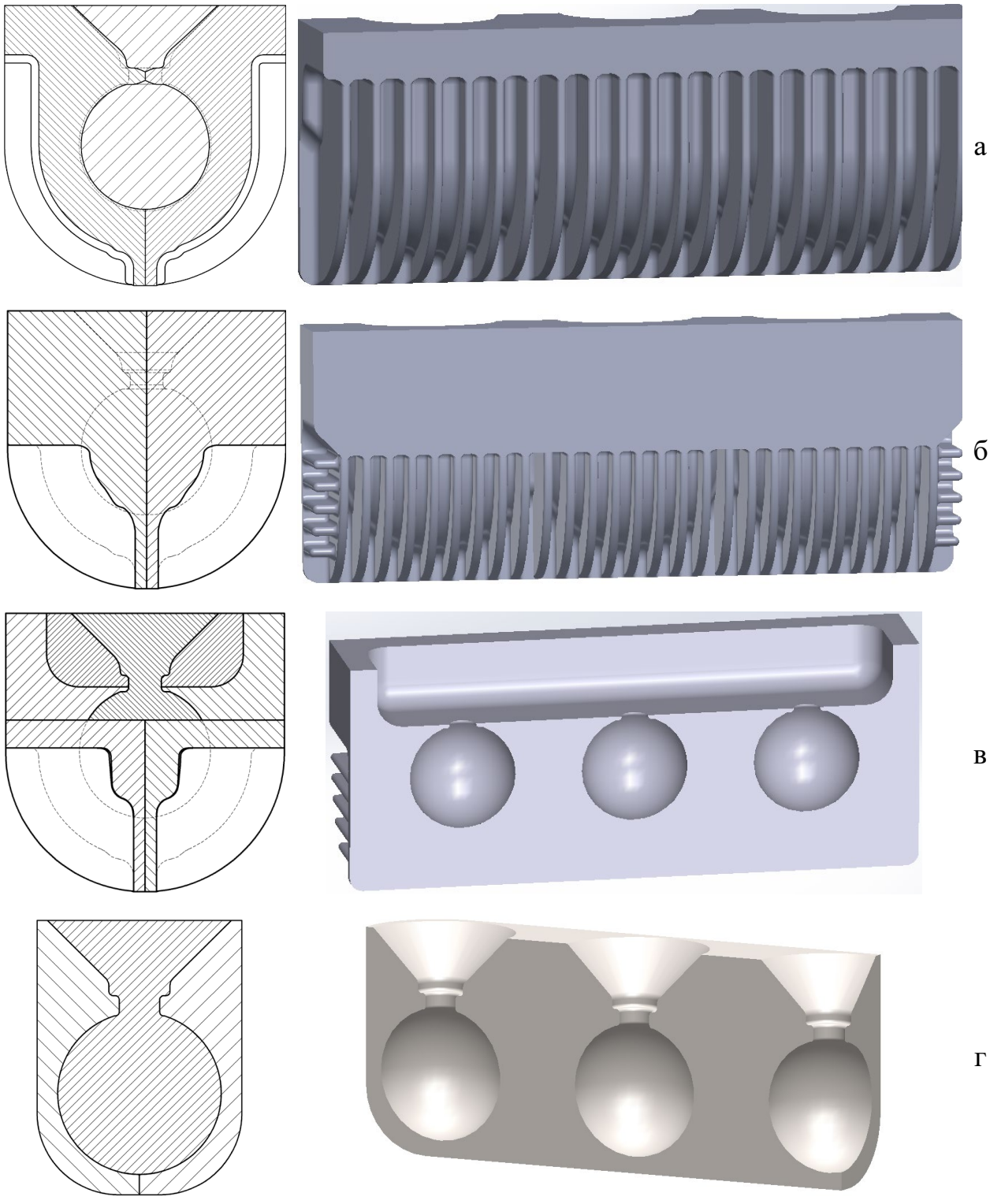


Рис.3.13. Технологічні рішення: а - ТР №6, б - ТР №7, в - ТР №8, г- ТР№9; ТР№8 - розроблено на основі ТР№7, в кокілі виконана порожнина для установки екзотермічної вставки

ТР№9 - розроблено на основі кокілю стандартної конфігурації; маса кокілю відповідає середній масі кокілю, виконаного з радіатором (рис. 3.13, г).

Контроль температурних полів здійснювали за розробленою схемою розташування термопар в процесі моделювання (рис.3.14).

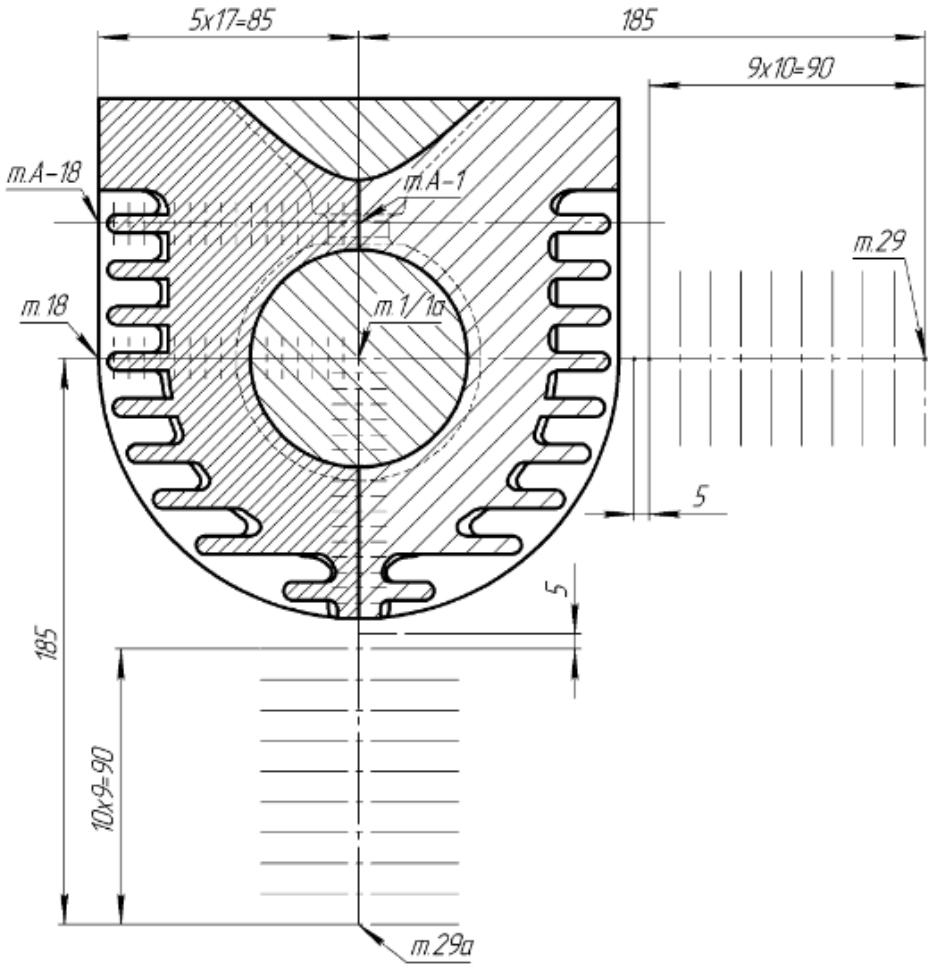
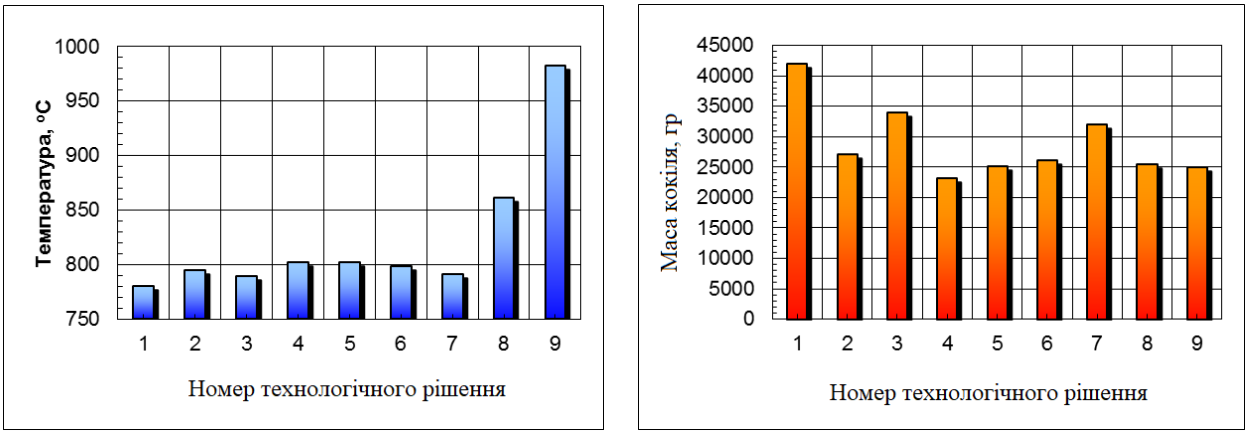


Рис.3.14. Схема розміщення термопар для вимірювання температурних параметрів в процесі моделювання заливки та охолодження виливка

На підставі даних, отриманих з кожної точки, згідно з розробленою схемою, були побудовані графіки, що наочно відображали процес зміни температури залежно від конструктивних особливостей кокілю (рис.3.15).



а б

Рис. 3.15. Експериментальні данні температури (а) і маси (б) кокілю для кожного розробленого ТР

Згідно з отриманими даними температурних полів було виразно видно, що переріз ливника був достатнім, перешийок не перемерзав до повного заповнення форми рідким металом (рис.3.16, а, б, в, ж, е, з, и). Після внесення експериментальних даних в план дизайну була отримана можливість їх аналізу за допомогою доступних інструментів програми STATGRAPHICS plus.

Отримані результати аналізу даних таблиці дисперсійного аналізу, Парето-карти (рис.3.17), оцінки поверхні відгуку (рис.3.18) показують, що статистично значущими є наявність радіатора, маса кокілю та їх комбінація.

Ефект трьох значущих параметрів відрізнявся трохи, таким чином добитися оптимальної температури охолодження найефективніше представлялося можливим із застосуванням легшого кокілю з радіатором в його конструкції. Графік взаємодії для параметрів температури і максимальної температури металу в кокілі наведений на рис.3.19. Результати моделювання представлені в табл.3.4.

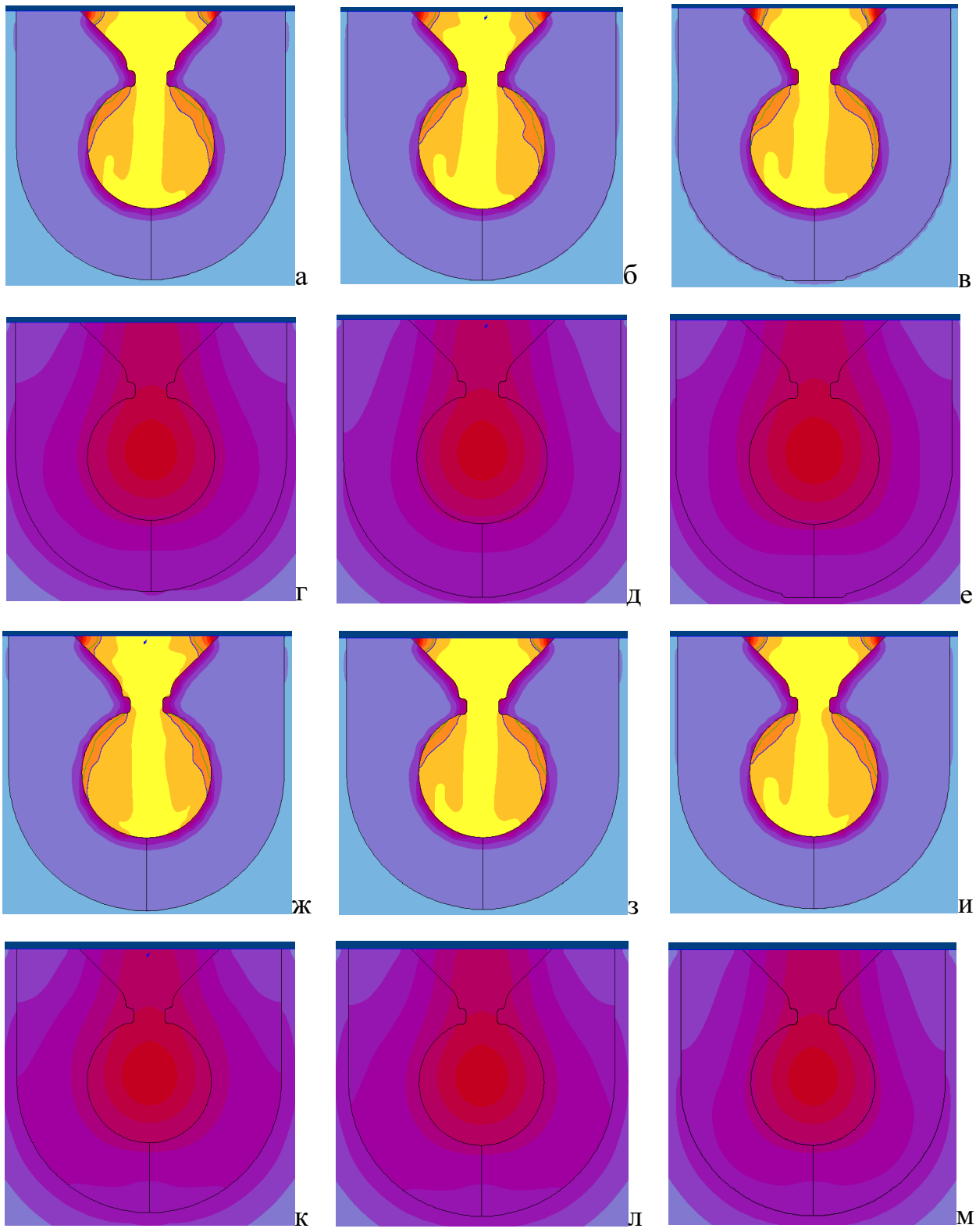


Рис.3.16. Контроль температурних параметрів в процесі охолодження:
а, б, в, ж, з, и – ТР №2, 3, 4, 5, 6, 7 відповідно, заповнення форми 100%; г, д, е, к, л, м – ТР №2, 3, 4, 5, 6, 7 відповідно, охолодження 1 хв 24,7 с з моменту початку заповнення форми

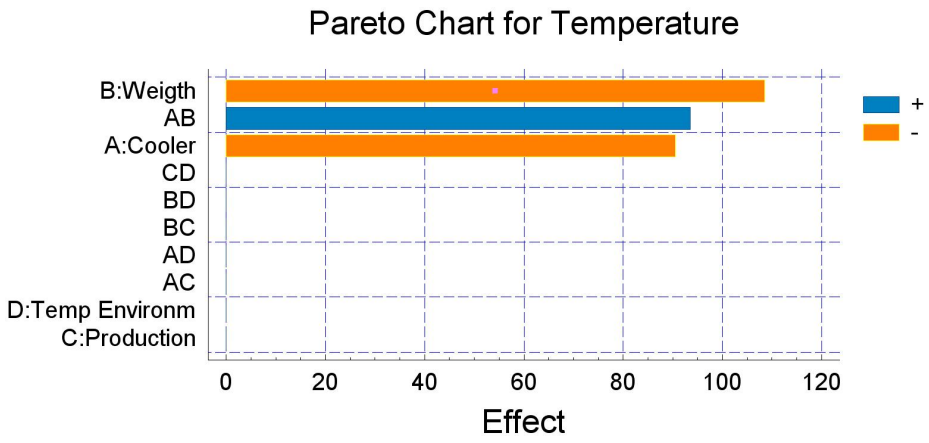


Рис.3.17. Виведення Парето-карти для параметра температура

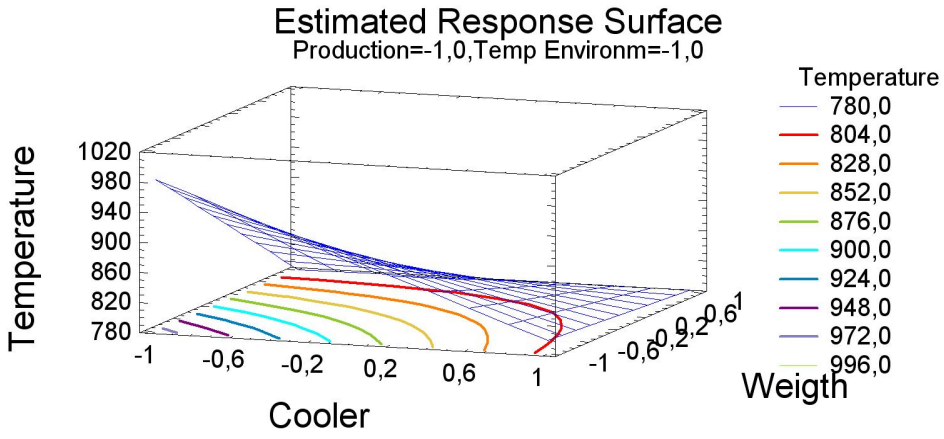
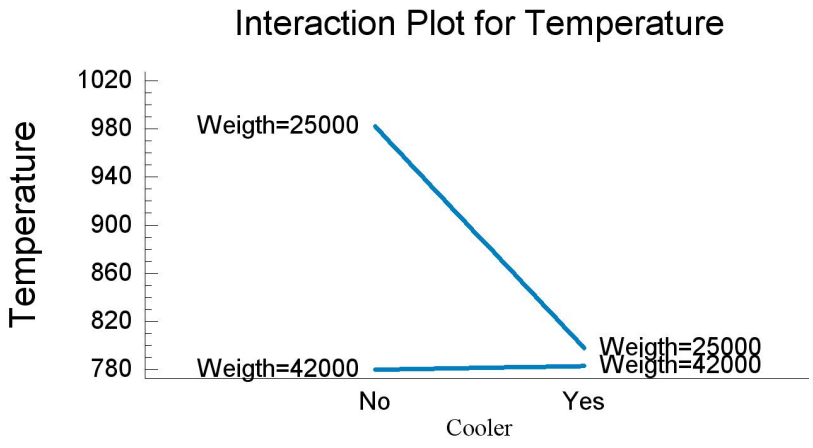


Рис.3.18. Виведення оцінки поверхні відклику для параметра температура



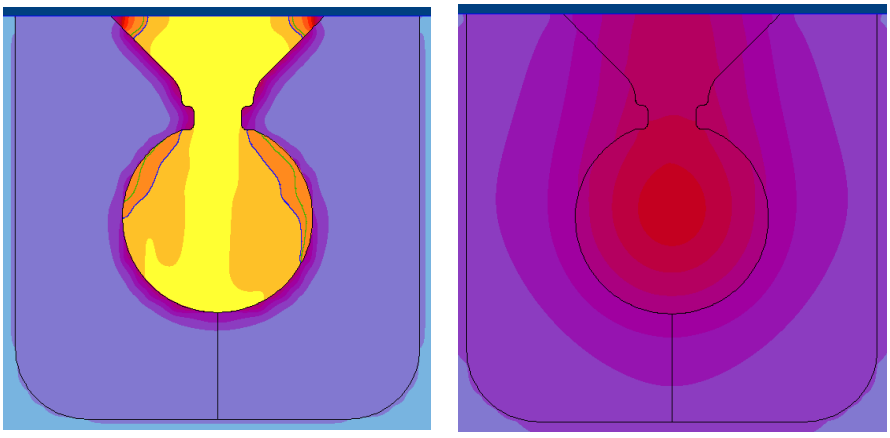
3.19. Графік взаємодії параметрів радіатор і температура

Таблиця 3.4

Основні результати комп’ютерного моделювання

№ТР	Час, с	Температура, °С	Маса кокілю, г
1	85	780	42062
2	85	795	27054
3	85	789	34018
4	85	802	23099
5	85	802	25082
6	85	798	26072
7	85	791	32005
8	85	861	25390
9	85	982	25032

Контроль температурних полів і особливостей охолодження кожного технологічного рішення детально представлені на рис. 3.20…3.22.



а б

Рис.3.20. Контроль температурних параметрів у процесі охолодження: а – ТР №1 заповнення форми 100%, б – ТР №1 охолодження 1 хв 24,7 с з моменту початку заповнення форми

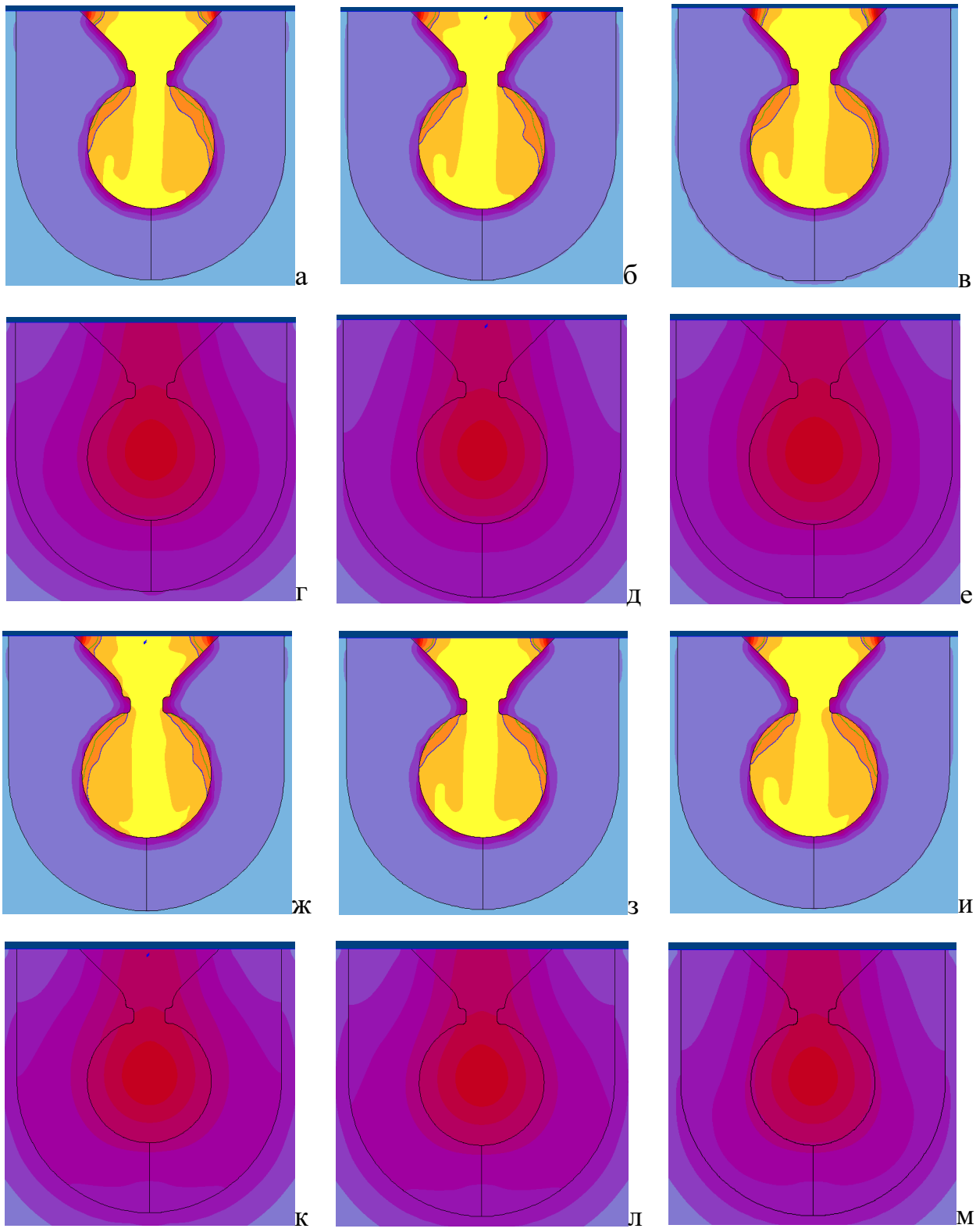


Рис.3.21 - Контроль температурних параметрів в процесі охолодження: а, б, в, ж, з, и – ТР №2, 3, 4, 5, 6, 7 відповідно, заповнення форми 100%; г, д, е, к, л, м – ТР №2, 3, 4, 5, 6, 7 відповідно, охолодження 1 хв 24,7 с з моменту початку заповнення форми

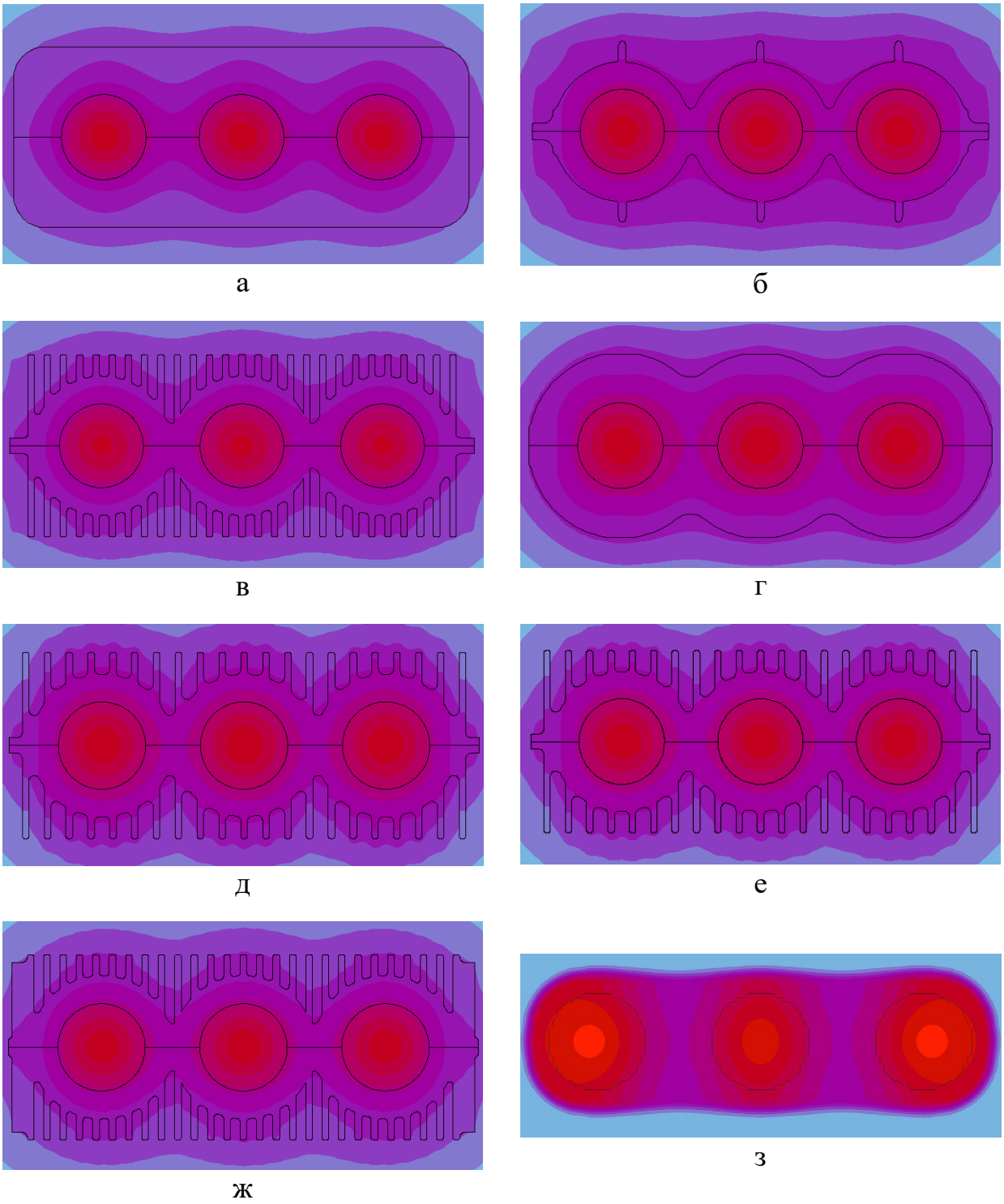


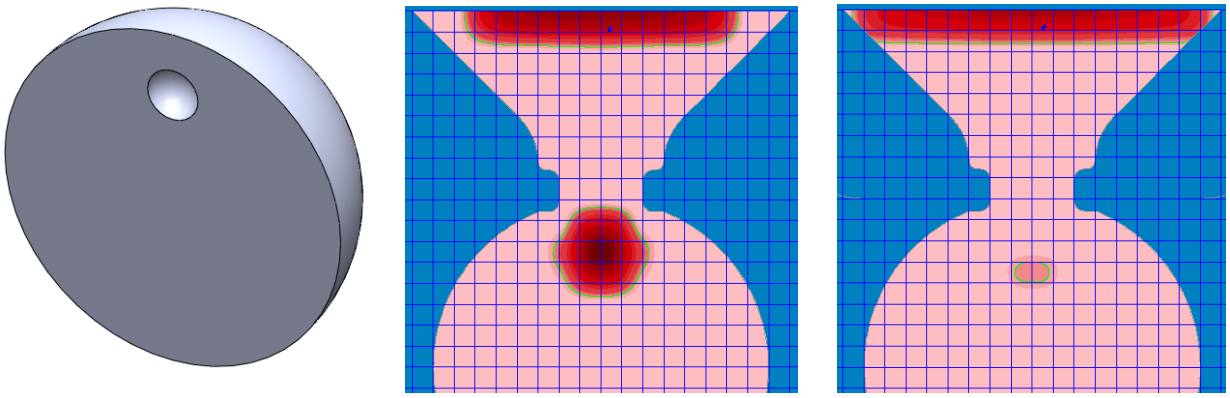
Рис.3.22 - Контроль температурних параметрів в процесі охолодження: а, б, в, ж, з, и, ж – ТР №1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9 відповідно, охолодження 1 хв 24,7 с з моменту початку заповнення форми

Згідно з отриманими експериментальними даними мінімальна температура була зафіксована для рішення ТР№1 і складала 780°С, а максимальна - для рішення ТР№9 - 982°С (див. рис. 3.21). Кокільна металева форма для кожного рішення мала різну масу (див. рис. 3.22).

В процесі кристалізації при стандартній технології виробництва подрібнювальних тіл в кокіль неминуче утворювалася усадкова раковина і пористість. Їх наявність трохи знижувала конструкційну міцність з огляду на те, що об'єм усадкової раковини не перевищував 0,5% (розрахунковий об'єм 0,44%) загального об'єму кулі [126].

Розрахунок об'єму усадкової раковини виконували на підставі раніше заданих осередків розміром 5 мм^3 в такій послідовності:

• розмір усадкової раковини виконували підрахунком осередків заздалегідь заданого розміру візуально, за цього визначали кількість осередків в концентрованій області усадкової раковини (рис. 3.23, б);



а б в

Рис.3.23. Утворення усадкових дефектів в результаті моделювання
а - модель виливка кулі і усадкової раковини;
б - усадкова раковина при виготовленні виливка по ТР№1, 2, 3, 4, 5, 6, 7;
в - усадкова раковина при виготовленні виливка по ТР№8

• у комп'ютерній програмі для проектування 3D моделей SolidWorks була створена модель кулі без усадкової раковини; за допомогою вбудованих

модулів розрахували масу кулі з розрахунковою густиною 7800г/мм^3, яка склала 2,8398 кг;

• у моделі кулі була виконана порожнина (рис. 3.23, а) на підставі розрахованої кількості осередків розміром 5мм^3 і потім розрахована маса кулі з усадковою порожниною, яка склала 2,91105 кг. Різниця отриманих мас, виражена у відсотках, склала 0,44%.

Як вже було відмічено вище, подрібнювальні тіла отримують на карусельно-кокільних і конвеєрно-кокільних ливарних машинах, тому вони мають характерні дефекти - усадкову пористість. Усунення цього дефекту можливе за допомогою застосування одноразових екзотермічних вставок. Тому, на основі технологічного рішення ТР№7 було розроблено рішення ТР№8 з можливістю застосування одноразової екзотермічної вставки (рис. 3.24).

Контроль температурних полів для рішень ТР№7 і ТР№8 при заповненні форми 100% по скінченні 0,77с (рис. 3.25 а, б) показав, що час охолодження при застосуванні екзотермічної вставки збільшувався за рахунок пізнішої кристалізації в області живильника-надливу; після 1 хв. 49 с максимальна температура виливка складала 861ºС в області живильника і 1147ºС - в області, що виділена облямівкою і позначена зеленим кольором.

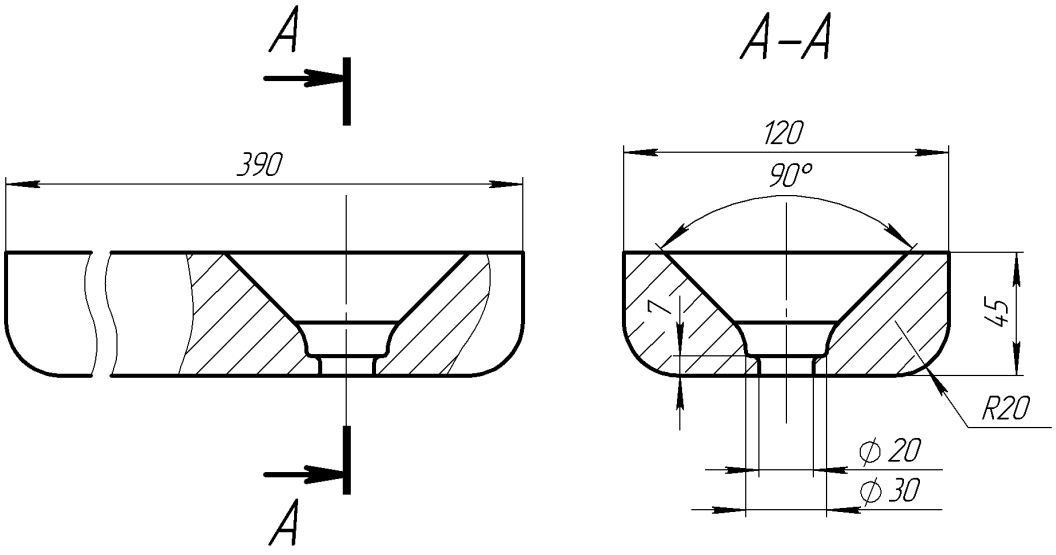


Рис.3.24. Екзотермічна вставка для технологічного рішення ТР№8

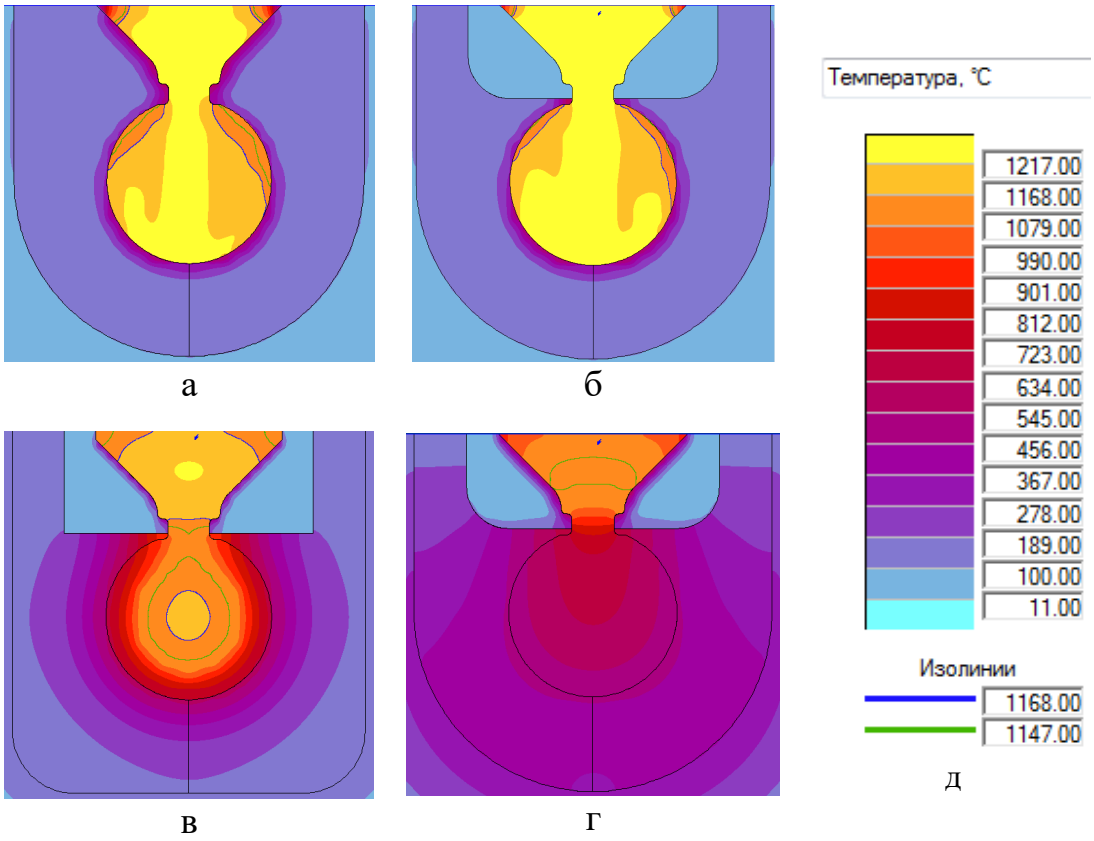


Рис. 3.25 - Контроль температурних полів в процесі охолодження: а, б - заповнення форми 100%; в - 27,2 сік з моменту початку заливки; г - охолодження кулі до температури 861°С; д - градієнтна шкала контролю температури в процесі охолодження

Таким чином, видима річ, що швидкість охолодження в металевій частині кокілю збільшувалася незначно (на 25 с) порівняно з рішенням ТР№7, проте було показано, що об'єм лійки, виконаної для утримування і спрямування струменя металу під час заливання, був здатний при застосуванні екзотермічної вставки повною мірою запобігти утворенню усадкових дефектів. Результатом застосування екзотермічної вставки для ТР №8 була відсутність усадкової раковини (див. рис.3.25, в).

Враховуючи вищевикладене і результати оптимізації технологічного процесу було встановлено, що:

а) найефективнішим у відведенні тепла було рішення ТР№1, а найменш ефективним - ТР№9;

б) технологічне рішення ТР№6 було оптимальним, оскільки поєднувало в собі наявність радіатору, що істотно зменшувало масу кокілю, ефективну тепловідвідну здатність, що трохи поступалася рішенню ТР№1, легкість виробництва через невелику кількість ребер і достатньої технологічної відстані між ними.

Важливо відмітити, що в результаті виконаного моделювання кокіль за рішенням ТР№1 за допомогою нескладного механічного оброблення був перероблений і мав конструкцію подібну рішенню ТР№6. Заливання і охолодження кокілю, який був виправлений по ТР№6 показали, що охолодження кокілю відбувалося швидкіше, ніж вказано в результаті комп'ютерного моделювання. Подібне відхилення було викликане циркуляцією повітря в цеху, на відміну від комп'ютерного моделювання, коли атмосфера навколо кокілю статична. Таким чином, практично кокіль з радіатором, через який проходять потоки свіжого повітря, в умовах реального виробництва є найефективнішим.

3.6 Моделювання та оптимізація технологічного процесу виготовлення куль

Технологічний процес виготовлення подрібнювальних тіл складається з багатьох технологічних операцій, кожна з яких може зробити вирішальний вплив на їх якість і експлуатаційні властивості.

З метою пошуку оптимального технологічного рішення провели дослідження впливу модифікування, температури вибивання виливків з форм, швидкості охолодження після вибивання на мікроструктуру чавуну і властивості виливків двох дослідних партій (табл.3.5) [20]. Характеристика основних параметрів виготовлення литих куль і їх значення наведені в таблиці 3.6.

Таблиця 3.5

Хімічний склад дослідних виливків [20]

Номер партії виливків	Номера дослідних виливків	Зміст хімічних елементів, мас.%							
		C	Si	Mn	P	S	Cr	ΣРЗМ	Fe
1	1-10	3,44	1,13	0,24	0,08	0,06	0,13	-	решта
2	11-20	3,53	1,05	0,26	0,12	0,05	0,15	0,08	решта

Таблиця 3.6

Дані по оптимізації технології виготовлення куль

Параметри технології виготовлення			Параметри оптимізації		Комплексний показник якості D
Вміст РЗМ, %	Температура виливка при вибиванні, °С	Охолоджувальне середовище після вибивання	Ударостійкість	Об'ємна твердість HRC	
1	2	3	4	5	6
–	950	–	12	49	0,524
–	950	вода	1	57,0	0,220
–	800	вода	2	54,0	0,130
–	650	вода	9	51,0	0,505
–	950	повітря	17	47,0	0,615
–	800	повітря	19	48,5	0,625
–	650	повітря	29	49,5	0,725
–	950	пісок	18	49,0	0,616
–	800	пісок	24	50,5	0,675
–	650	пісок	30,3	47,5	0,700

Продовження табл. 3.6

1	2	3	4	5	6
0,08	950	вода	1	58,5	0,225
0,08	800	вода	3	58,5	0,315
0,08	650	вода	10	47,0	0,462
0,08	950	повітря	28	50,0	0,728
0,08	800	повітря	39	51,5	0,837
0,08	650	повітря	35	51,0	0,828
0,08	950	пісок	26	46,5	0,643
0,08	800	пісок	30	50,0	0,743
0,08	650	пісок	34	52,0	0,783

Планування експерименту виконували за допомогою повного факторного експерименту, реалізованого за допомогою комп'ютерної програми STATGRAPHICS plus. Досліджували вплив технологічних параметрів виготовлення виливків, таких як: наявність в сплаві РЗМ - "RZM", температура виливка при вибиванні з форми - "Temperature", середовище, що охолоджує, після вибивання (повітря або пісок) - "Environment" і температура цього середовища -" Environmental temperature" на параметри оптимізації: об'ємну твердість - параметр "Hardness" і ударостійкість - параметром "Hit".

Отримані результати аналізу даних - таблиці дисперсійного аналізу (рис. 3.26), Парето-карти на параметри (рис.3.27 і 3.28), оцінки поверхонь відгуку або відхилення ефектів від нормального розподілу (рис. 3.29 і 3.30), показали, що статистично значущими були:

– для параметра «об'ємна твердість» - наявність в сплаві РЗМ;

– для параметра «ударостійкість» - наявність в сплаві РЗМ; температура вибивання; комбінація наявності РЗМ і температури вибивання; комбінація наявності РЗМ і довкілля, в яке відбувається охолодження.

Analyze Experiment - Hit

Lbl: Row:

Analysis of Variance for Hit

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:RZM	324,0	1	324,0	45,00	0,0011
B:Temperature	64,0	1	64,0	8,89	0,0307
C:Environment	4,0	1	4,0	0,56	0,4896
D:Environmental temp	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
AB	64,0	1	64,0	8,89	0,0307
AC	64,0	1	64,0	8,89	0,0307
AD	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
BC	4,0	1	4,0	0,56	0,4896
BD	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
CD	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
Total error	36,0	5	7,2		
Total (corr.)	560,0	15			

R-squared = 93,5714 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 80,7143 percent
Standard Error of Est. = 2,68328
Mean absolute error = 1,5
Durbin-Watson statistic = 2,75 (P=0,0091)
Lag 1 residual autocorrelation = -0,4375

Рис.3.26 - Таблиця дисперсійного аналізу для параметра ударостійкість

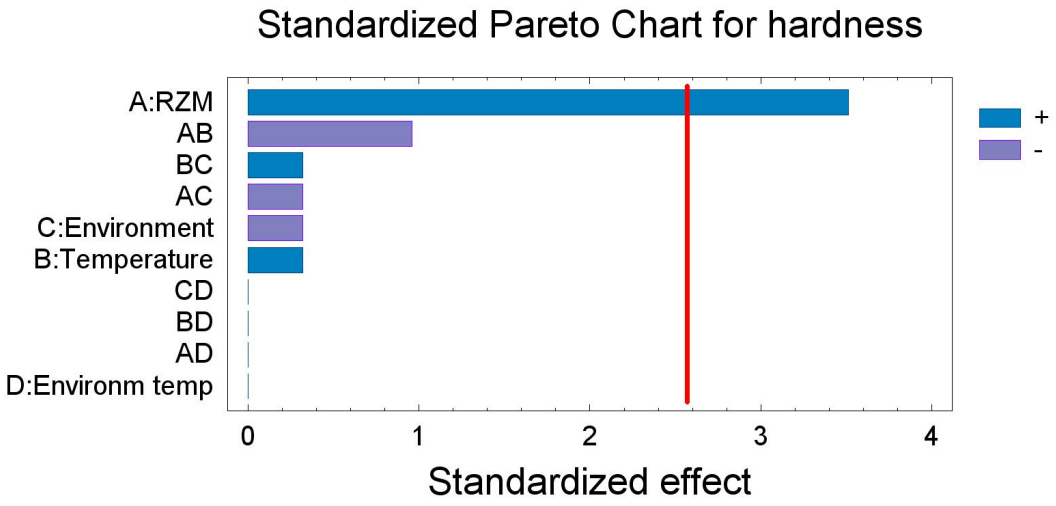


Рис.3.27 - Виведення Парето-карти для параметра температура

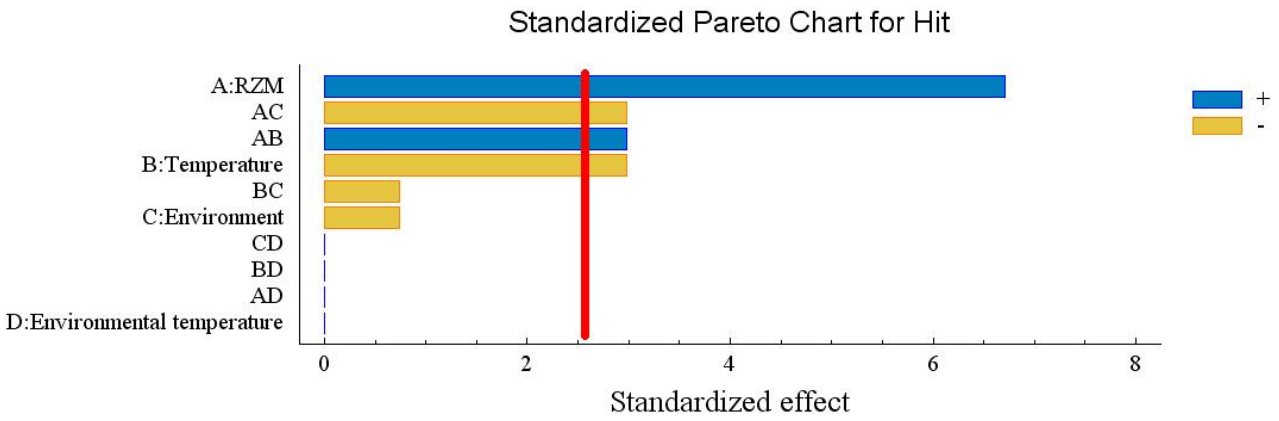


Рис.3.28 - Виведення Парето-карти для параметра ударостійкість

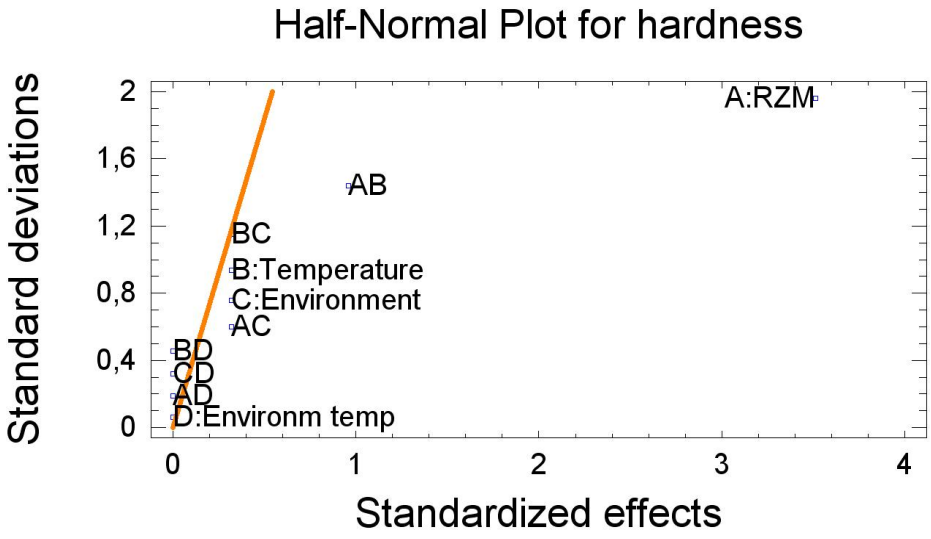


Рис.3.29 - Відображення відхилення ефектів від нормального розподілу для об'ємної твердості

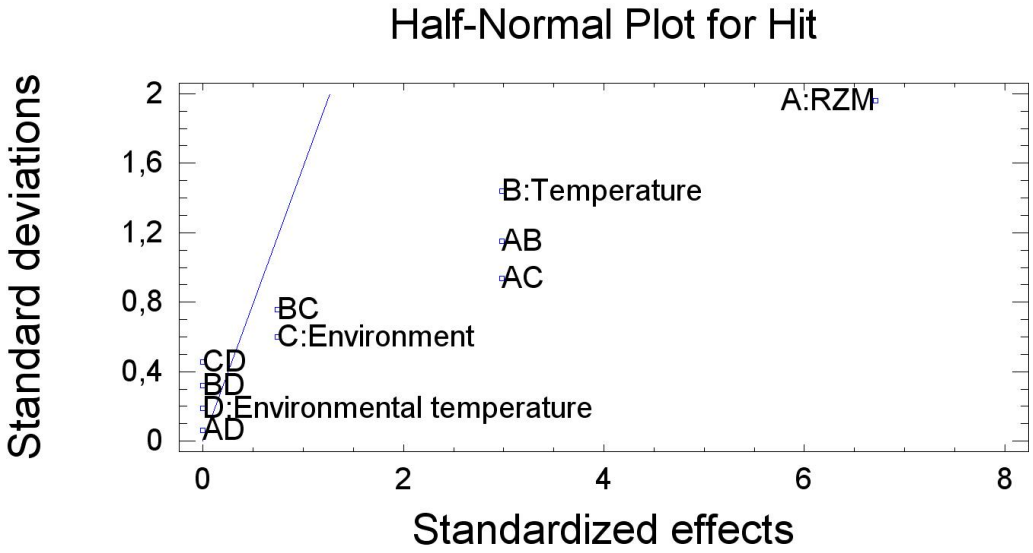


Рис. 3.30 - Відображення відхилення ефектів від нормального розподілу для ударостійкості

На підставі отриманих результатів згідно з планом експерименту були проведені лабораторні дослідження (див. табл. 3.5). Окрім експериментів, передбачених планом експерименту, додатково дослідили процес з вибивання виливків при температурі 950ºС, додаткове середовище, що охолоджує, після

вибивання - вода і комбінації цих параметрів з розробленими згідно з планом експерименту.

Додаткові досліди не враховувалися в ПФЕ, оскільки показали незадовільні результати, тому що значення ударостійкості і об'ємної твердості, отримані при вибиванні виливків з температурою 950ºС мали мінімальні значення, а охолодження у воду привело до критично низьких значень ударостійкості для усіх комбінацій параметрів [30].

По технологічних параметрах (див. табл. 3.1 і 3.3) були виготовлені дослідні кулі і проведений металографічний аналіз їх матеріалу [20,130] (рис.3.31).

У поверхневому шарі литих куль (до 5мм від литої поверхні), охолоджених на повітрі, модифікування РЗМ сприяло кристалізації чавунів за метастабільною системою, за цього графітних включень у структурі не було. Карбідна фаза в модифікованих чавунах була тонкіша, площа включень балу Цп2000, дендрити аустеніту мали виражену спрямованість, ледебуриту також було менше, ділянки ледебуриту були орієнтовані переважно уздовж дендритів і мали менші розміри. Перліт був тоншої будови Пд0, 3…Пд0, 5, вміст цементиту - балу Ц40.

У немодифікованих чавунів, з такими самими умовами кристалізації, окрім відміченого вище, спостерігалася поява графітних включень. Наступне пониження температури вибивання немодифікованих виливків призводило до збільшення кількості графітних включень (див. рис. 3.31 а, б).

У поверхневому шарі литих куль, охолоджених у воді, кристалізація модифікованих і не модифікованих чавунів проходила по метастабільній системі. Матриця чавунів мала усю гамму продуктів евтектоїдного розпаду аустеніту - від мартенситу, бейніту до троститу і пластинчастого перліту дисперсністю Пд0, 5…Пд1, 0 (див. рис. 3.31 в, ж).

У поверхневому шарі литих куль, охолоджених в піску, для модифікованих і не модифікованих чавунів, відмінностей в мікроструктурі не було виявлено (див. рис. 3.31 г, з).

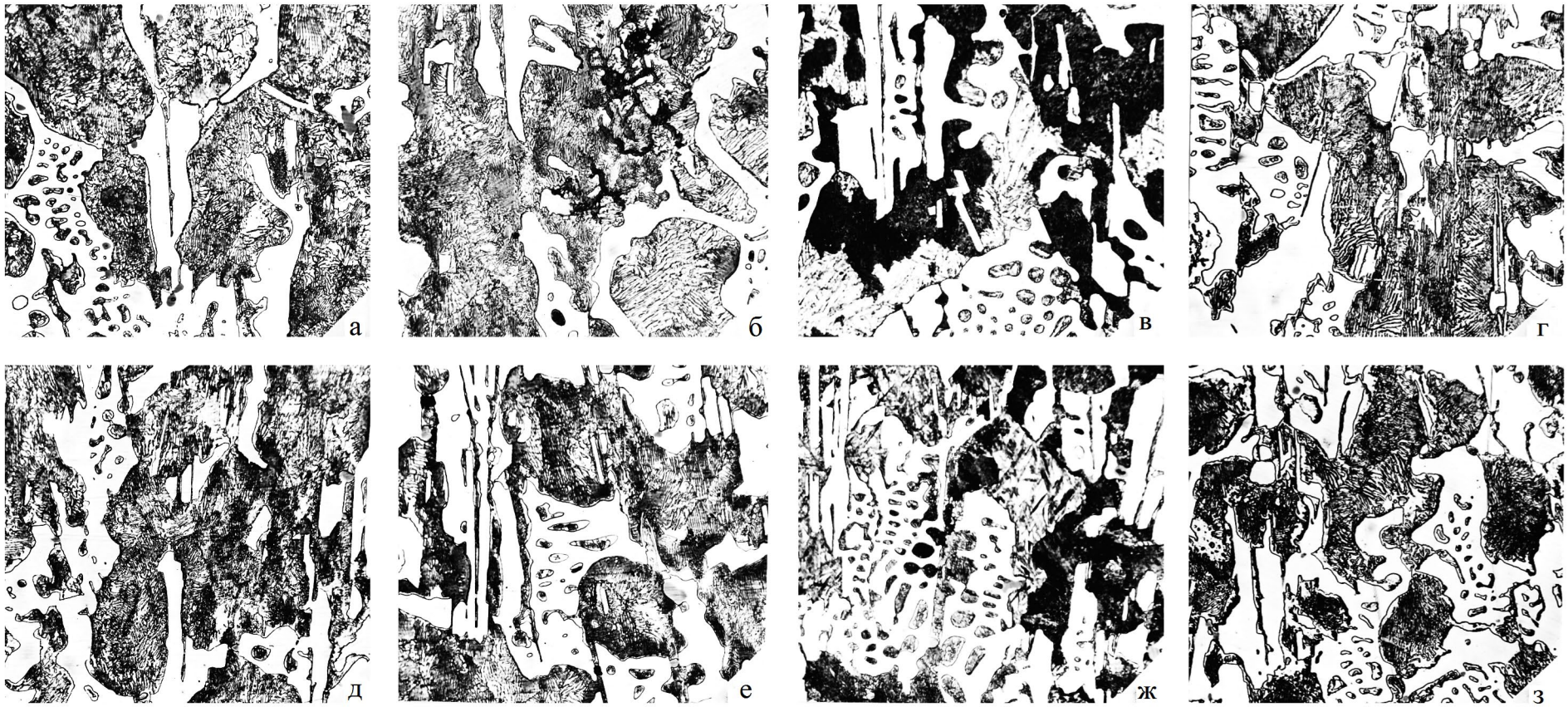


Рис. 3.31-Мікроструктура дослідних чавунів:

а-г - не модифікований чавун, д-з - модифікований РЗМ, а,г,д,з дослідних виливків після вибивання їх із форм з охолодженням при температурі 950 °С, в,ж - 800 °С та б,е - 650 °С, а,б,д,е - на повітрі, в,ж - у воді та г,з - в піску (температура охолоджуваного середовища 18 ±2°С); 500^{x}

Модифікування сприяло підвищенню дослідних властивостей матеріалу виливків: ударостійкості у 2 рази, об’ємної твердості на 3% [130].

Контроль результатів, отриманих експериментальних даних і визначення оптимального режиму отримання куль, яке додатково проводили за допомогою комплексного показника якості - узагальненій функції бажаності D, дозволило вдосконалити технологічний процес за рахунок: 1– модифікування розплавів комплексним модифікатором на основі РЗМ; 2 – вибивання виливків з ливарних форм при температурі 650…800ºС; 3 – охолодження вибитих виливків здійснювати на повітрі [20].

3.7 Виробничі випробування вдосконаленого технологічного процесу виготовлення литих куль

Виробничі випробування розробленого технологічного процесу виробництва литих куль проводили в ливарному цеху ПАТ «Марганецький рудоремонтний завод».

В результаті випробувань було показано, що виливки, що були виготовлені за вдосконаленою технологією, мали підвищені службові властивості: ударостійкість на 45, об'ємну твердість - на 7%. Крім того, за рахунок зміни конструкції кокілю збільшилася швидкість кристалізації і охолодження виливків, що сприятливо відбилося на мікроструктурі їх матеріалу, знизилися витрати на технологічне оснащення із-за її меншої металоємності, а також підвищилася продуктивність виробничого устаткування (акт випробування від 03.04.2014 р.).

3.8 Висновки за розділом 3

1. Проаналізовані дві промислові технології виготовлення чавунних подрібнювальних куль, які застосовували на ПАТ «АвтоКраз»: литтям в піщану форму одночасно 36 виливків та у чотиримісні кокільні форми. Моделювання технологічних процесів одержання чавунних подрібнювальних куль литтям в піщані форми показало, що ливарні дефекти були в наявності в усіх виливках, причиною їх утворення було використання нераціональної ливниково-живлючої системи. Моделювання серійного технологічного процесу виготовлення чавунних подрібнювальних куль способом кокільного лиття показало несуттєву кількість усадкових дефектів, але при відділенні ливникової системи в галтувальному барабані відбувався відрив частини кулі і виходило так зване кулясте тіло.

2. Проведені лабораторні дослідження дозволили встановити структурні зміни, які відбуваються в дрібних виливках з низьколегованого модифікованого РЗМ чавуну та їх вплив на службові властивості. Показана доцільність застосування для модифікування виливків з низьколегованого чавуну комплексних модифікаторів на основі рідкоземельних металів.

3. Отримані результати власних дослідницьких плавок з застосуванням для модифікування виливків комплексних модифікаторів на основі рідкоземельних металів дозволили вдосконалення хімічні склади та властивості виливків та запатентувати нові склади чавунів для лиття подрібнювальних куль (патенти України на винаходи № 97439 «Чавун» та № 99218 «Чавун зносостійкий»).

4. Визначення найбільш ефективної конструкції кокілю і дослідження процесу кристалізації в ньому дозволило обрати з дев'яти технологічних рішень нову конструкція кокілю з наявністю радіатору, що істотно зменшувало масу кокілю та його ефективну тепловідвідну здатність.

5. В виробничих умовах ливарного цеху використання кокілю нової конструкції показало, що охолодження кокілю відбувалося швидкіше, ніж за

розрахунком комп'ютерного моделювання, тобто практично кокіль з радіатором, через який проходять потоки свіжого повітря, в умовах реального виробництва є найефективнішим.

6. На підставі експериментальних досліджень і комп'ютерного моделювання був розроблений вдосконалений технологічний процес кокільного лиття куль, що включає позапічне модифікування розплаву чавуну рідкоземельними металами, вибивання виливків з форм при температурі в інтервалі 650….800ºС і охолодження після вибивання на повітрі. Комплексний показник якості виливків, виготовлених за такою технологією, підвищувався на 58….60% в порівнянні з виливками серійного виробництва.

5. Виробничі випробування розробленого технологічного процесу виробництва литих куль показали поліпшення структури і службових властивостей матеріалу.

Матеріали розділу опубліковано у [20, 122, 126-131].

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ЛИТТЯ ВИЛИВКІВ З СЕРЕДНЬОЛЕГОВАНИХ МОДИФІКОВАНИХ ЧАВУНІВ

Чавунні валки є основним змінним інструментом прокатних станів, яке значною мірою впливає на ефективність і якість прокатного виробництва. У сучасних умовах від чавунних валків потрібно високі механічні і експлуатаційні властивості. Існують різні методи підвищення властивостей прокатних валків, одними з яких є модифікування і термічна обробка.

У роботах [132-138] детально розглянута можливість обробки валкових чавунів комплексними модифікаторами, що містять РЗМ, та індивідуальними РЗМ, але матеріал двошарових прокатних валків модифікуванню до сьогодні ще не піддавали.

Для легованих мартенситних чавунів під час теплового оброблення заготовок валків частіше рекомендують повільне нагрівання зі швидкістю 15-25 ^{o}C/год до температури 250-350^{o}C, витримка протягом 8-12 год та повільне охолодження у печі зі швидкістю 15-25 ^{o}C/год, однак досліджень з теплового оброблення двошарових прокатних валків до тепер майже немає.

Метою цієї частини роботи є дослідження і удосконалення технології виготовлення прокатних валків виконання ЛПХНд-71 з застосуванням комплексної обробки: модифікування комплексним модифікатором, що містить РЗМ, для підвищення властивостей та термічного оброблення заготовки валка, що необхідно для забезпечення підвищеної експлуатаційної надійності.

4.1 Технологія виготовлення двошарового прокатного валка

4.1.1 Лиття двошарового прокатного валка

Двошарові прокатні валки виконання ЛПХНд-71 ТУ У 27.1-26524137-1291-2007 відливають в Україні в стаціонарні комбіновані форми способом «промивання». Для заливки ливарної форми застосовують чавуни двох складів: основний середньолегований чавун, що містить хрому 0,6-1,2% і нікелю 3,5-4,3%, та промивний нелегований чавуни.

Валкову ливарну форму через тангенціальну ливникову систему заповнюють спочатку основним металом до рівня, що перевищує верхній торець бочки валка на 250...350 мм. Після тимчасової витримки для твердіння вибіленого шару завтовшки 30-40 мм здійснюється промивання валкової ливарної форми (кількість чавуну для промивання 40-50% маси валка).

Для проведення дослідження впливу модифікування на властивості робочого шару прокатних валків виконання ЛПХНд-71 застосовували комплексний модифікатор марки ФС30РЗМ30 наступного хімічного складу, %: Si - 44%; Al - 9%; РЗМ - 32%; Fe ≤ 15%.

Плавку дослідного чавуну проводили в індукційній печі моделі ІЧТ-6 в умовах вальцеливарного цеху, температура розплаву перед випуском була 1430-1500ºС. Легований чавун з електропечі зливали повністю у ківш з подрібненим до фракції 30-50 мм модифікатором у кількості 0,15% від маси розплаву. Одночасно з випуском легованого чавуну закінчувалося накопичення промивного чавуну з вагранки. Кількість промивного чавуну була на 1-1,5 т більшою, ніж потребується для заливання валка (40-50%). Остаточний хімічний склад основного і промивного металів бути у таких межах (табл. 4.1).

Таблиця 4.1

Хімічні склади дослідних основного і промивного металів

Дослідний метал	Зміст хімічних елементів, %							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	РЗМ
Основ-ний	2,7-3,0	0,2-0,7	0,4-0,6	< 0,15	<0,10	0,6-1,2	3,5-4,3	0,05-0,08
Промив-ний	3,2-3,6	2,5-3,0	< 0,7	< 0,15	< 0,15	_	_	_

При температурі 1300-1320ºС основний метал заливали у валкову форму, далі робили витримку і за такої ж температури заливали промивний метал у валкову форму. Присадка модифікатора була 0,15 мас.%. Хімічний склад дослідного та серійного прокатних валків наведений в табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Хімічний склад дослідних валків

Валок	Зміст хімічних елементів, %								
	C	Si[1]	Si[2]	Mn	P	S	Cr	Ni	РЗМ
дослідний	2,71	0,45	0,97	0,67	0,48	0,10	0,75	3,80	0,04
серійний	2,90	0,55	1,12	0,80	0,46	0,09	0,78	3,76	–

Примітка. [1] – основний метал, [2] – промивний метал.

4.1.2 Визначення режиму термічного оброблення литої заготовки

Термічна обробка сталевих валків широко і давно застосовується у вальцеливарному виробництві, в цей же час термічна обробка чавунних валків носить нестандартизированний одиничний або дослідний характер і не отримала належного розвитку. Це пов'язано з відсутністю обґрунтованих рекомендацій режимів термічної обробки і спеціальних печей.

Підприємства, що проводять модернізацію виробництва, як правило, застосовують сучасні печі імпортного виробництва з електронним управлін-

ням і здійснюють термічну обробку по графіках, отриманих дослідним шляхом. У зв'язку з цим видається особливий інтерес в розробці точних, науково-обгрунтованих режимів термічної обробки для конкретних виконань і типорозмірів чавунних валків.

Метою цієї частини роботи було проведення лабораторних досліджень та розробка режиму промислової термічної обробки заготовок чавунних двошарових листопрокатних валків виконання ЛПХНд-71, оброблених комплексним модифікатором, що містить РЗМ, з діаметром бочки 500мм, для зняття внутрішньої напруги і підвищення експлуатаційної надійності.

У литих відбілених валках після вибивання з ливарних форм більшою чи меншою мірою [91] зберігається внутрішня напруга, причиною появи яких служить нерівномірна усадка в різних перерізах. Напруги у валках різних виконань будуть неоднакові, і залежать від градієнта температур між центром і зовнішніми частинами, а також від градієнта температур по довжині валка. При проектуванні і моделюванні технологічного процесу виготовлення листопрокатних валків виконання ЛПХНд-71 діаметром 500мм за допомогою пакетів SolidWorks і LVMFlow були отримані дані градієнту вищезгаданих температур. На величину внутрішньої напруги впливає також теплопровідність металу і модуль пружності. Згідно з даними [139] у валках діаметром 200-250мм навіть при охолодженні впродовж 80 год після заливки і роздягнених при температурі 50ºС осьова напруга складає 5, радіальних - 2-3 і тангенціальні - 4-5 кгс/мм².

Літературний огляд цього питання дозволяє зробити висновок, що дані про структурні перетворення, які відбуваються у валкових чавунах, при різних режимах термічної обробки обмежені. Згідно з даними компаній Åkers Group 53%, Friedrich Krupp AG Hoesch - Krupp 59% типів чавунних валків піддаються термічній обробці по різних режимах, при цьому компанії вказують на істотну зміну структури і фізико-механічних властивостей. При цьому дані про режими термічної обробки, як і у більшості літературних джерел не вказані.

У розділі приведений порівняльний аналіз рекомендованих режимів низькотемпературного відпалу і експериментальних з метою розробки раціонального режиму відпалу.

Визначення параметрів режиму відпалу найчастіше роблять по нормах нагріву залежно від товщини відливання або розрахунком [140-142]. Наприклад, згідно з даними Американського суспільства по термічній обробці [140] виріб з вуглецевої сталі рекомендується нагрівати перед загартуванням із швидкістю 1ч на 25мм діаметру або товщини, а потім витримувати при цій температурі не менше 1/5 часу, необхідного для нагріву. Застосовність рекомендованих Американським суспільством норм нагріву для валків має бути перевірена, оскільки приводяться норми нагріву для вуглецевих сталей, а не чавунів. При цьому пропоновані норми не дають конкретних рекомендацій по вибору режиму низькотемпературного відпалу валків залежно від їх розмірів.

У роботі [141] рекомендується режим термічної обробки валків типу ЛПХНд з витримкою для прогрівання 8-12 год залежно від розмірів, як це встановлювати конкретно, наприклад, для валка діаметром 500 мм не показано. Виходячи з вищезгаданого розрахунок нагріву циліндричних тіл, у тому числі валків, робили по формулах Н.Ю. Тайца [142].

Розрахунок часу нагріву валка діаметром 500мм при швидкості нагріву печі до температури витримки 25ºС/ч, Δt=5ºС. Перепад температур у кінці нагріву визначали по формулі:

$$\Delta t_0 = \frac{CR^2}{4a} \qquad (4.1)$$

де С - швидкість нагріву, ºС/год;

R - радіус валка, м;

а - коефіцієнт температуропровідності, м²/год.

$$\Delta t_0 = \frac{25 \times 0.25^2}{4 \times 0.02} = 20°C$$

$$m = K_{\phi} \times K_{T} = 0{,}68 \times 0{,}45 = 0{,}31$$

$$\tau = m \times \frac{R^2}{a} = \frac{0.31 \times 0.25^2}{0.02} = 1ч$$

Таким чином, згідно з розрахунком тривалість витримки для вирівнювання температури по перерізу валка діаметром 500 мм складає ~1 год [132].

Відомо, що рекомендовані норми витримки валків при температурі відпалу сильно відрізняються від розрахункових. Тому для розробки раціонального режиму відпалу потрібне експериментальне визначення параметрів низькотемпературного відпалу валків [30].

В ході досліджень експериментально визначали швидкість нагріву дослідних валків діаметром 500мм. Підйом температури в печі вели відповідно до рекомендованої граничної швидкості 25ºС/год. Різниця температур поверхні і осі при швидкості нагріву 25ºС /год при діаметрі 500мм дорівнювала 40ºС (рис.4.1).

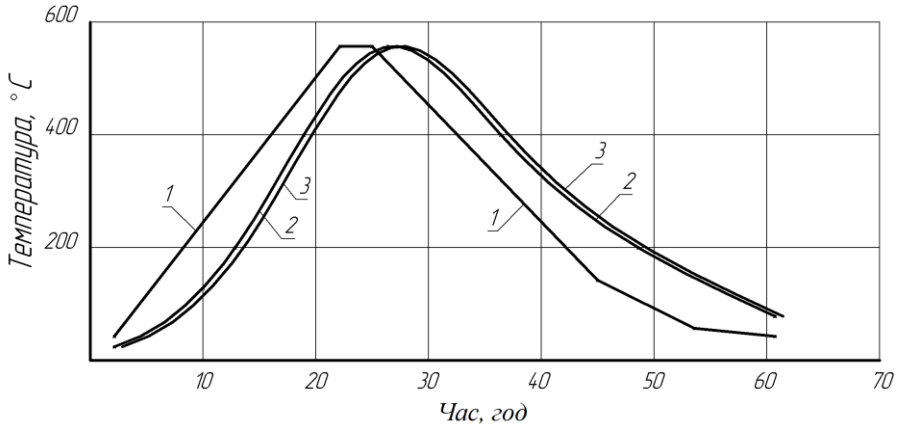


Рис.4.1. Температура по перерізу валка діаметром 500 при низькотемпературному відпалі: 1 - температура печі; 2 - на глибині 0,03R; 3 - на глибині R

При підвищенні швидкості нагріву різниця температур по перерізу валків збільшувалася до 80ºС і вище, що призводило до руйнування валків [59, 125].

Тривалість витримки при постійній температурі 250ºС для валків діаметром 500мм складала 9,5 год.

Охолодження проводили із швидкістю 25 ºС/год. Отримані при литті і термічній обробці експериментальні криві охолодження у відповідних точках валка (рис.4.2) практично не відрізнялися. Так, отримана середня швидкість охолодження в ливарній формі дорівнює 18,0 ºС /ч, при термічній обробці 17,6 ºС /ч.

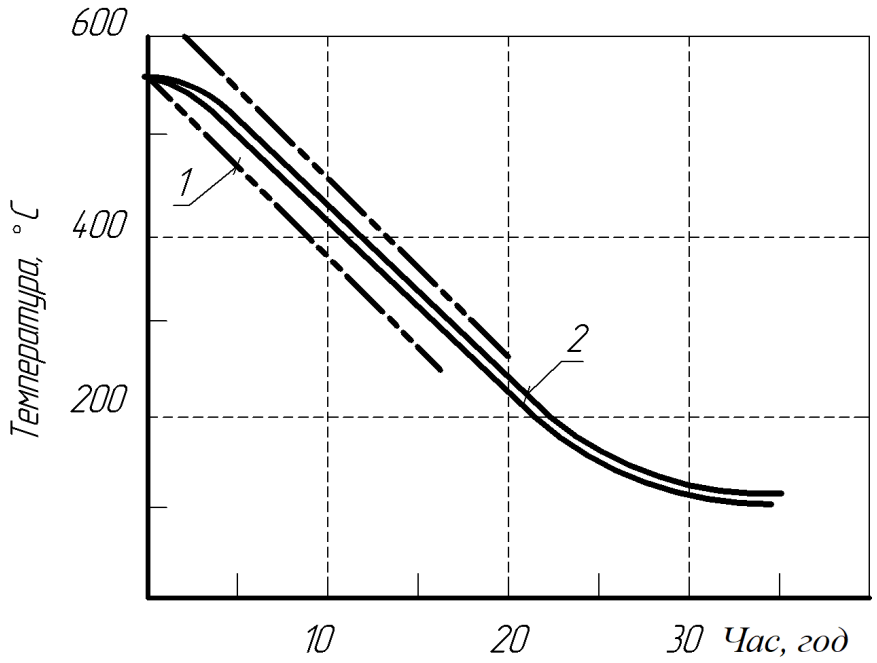


Рис. 4.2- Швидкість охолодження валка Ø500мм:
1 – ливарна форма; 2 – термічна обробка

Таким чином, величина залишкової внутрішньої напруги у валках визначається тільки значеннями температурного перепаду по перерізу валка при охолодженні. Температурний перепад в процесі охолодження при термічній обробці не перевищував 25ºС, а при охолодженні у формі досягав 95ºС.

В результаті, залишкова напруга після відпалу також має бути значно нижче за ливарних.

Експериментально встановлено правило - для запобігання утворенню тріщин і виникнення вторинної напруги у валках при термічній обробці швидкості їх нагрівання і охолодження не повинні перевищувати 25 ºС/год.

У лабораторних умовах експериментально дослідили вплив циклічного відпалу, який проводили на установці ВДТА-8М. Металографічний аналіз показав, що перетворення аустеніту при циклічному відпалу проходило з утворенням перліту виду Пт2. Крім того, зі збільшенням кількості циклів до десяти у порівнянні з литим станом збільшувалася кількість фериту у 2,5 разів, тому при циклічному відпалі валкових чавунів в роботі [143] не рекомендовано збільшення кількості циклів більше чотирьох.

Таким чином, було прийнято, що для двошарового валка діаметром 500 мм режим теплового оброблення повинен складатися з нагрівання зі швидкістю 25ºС/год до температури 150ºС, витримки протягом 9,5 год (з двократною циклічністю температури 250 $\Leftrightarrow$ 150ºС) та остаточного охолодження у печі зі швидкістю 25 ºС/год до 80 ºС.

4.2 Дослідження структури і властивостей матеріалу валків

4.2.1 Структура бочок валків

Структуру бочок валків дослідили, починаючи з відстані 10 мм від литої поверхні до 100 мм.

У робочому шарі дослідного і серійного валка спостерігали рідкі включення графіту, які мали або компактну або розеткову форму (рис.4.3,а,в). При русі углиб валків по бочці кількість і розміри розеток графіту збільшувалися (рис.4.3 б, г). Чавуни робочих шарів і дослідного, і серійного валків мали структуру грубого конгломерату цементиту і продуктів перетворення аустеніту (рис. 4.4 а, б).

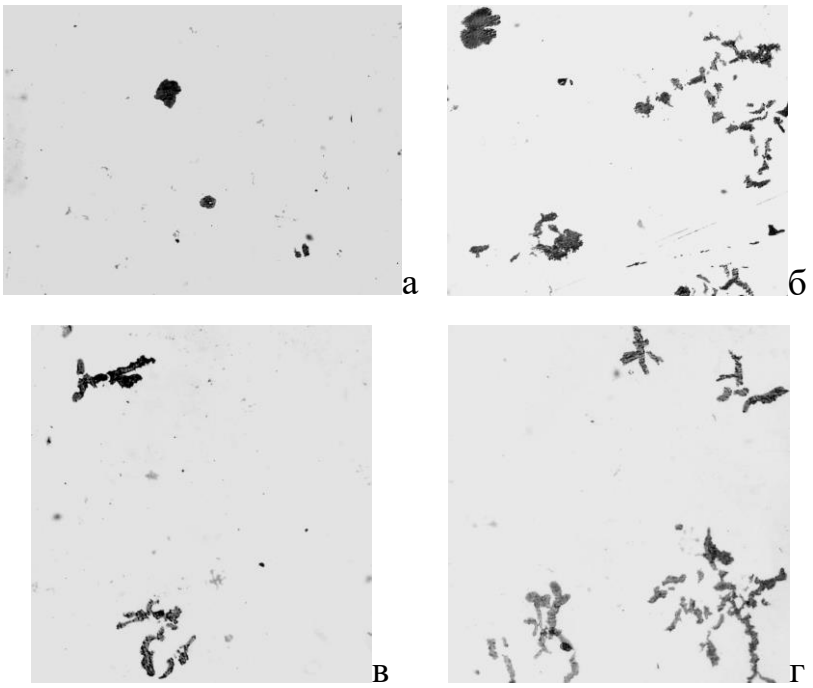


Рис. 4.3. Мікроструктура чавунів бочок валків (не травлено) серійного виробництва (а, б) та дослідного після комплексної обробки (в, г) на відстані 10 (а,в) та 20 мм від поверхні (б, г); х100

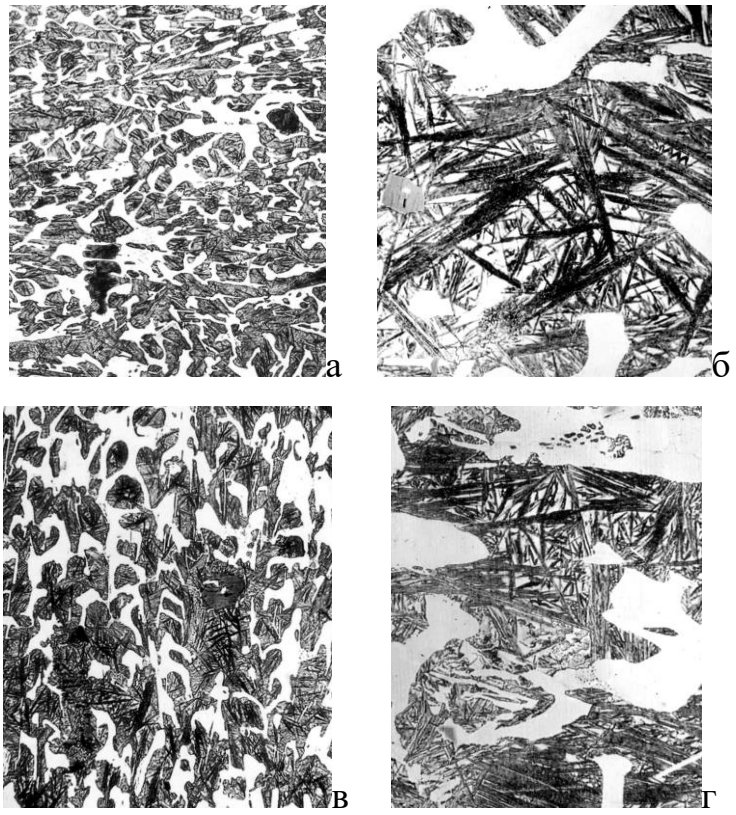


Рис. 4.4 . Мікроструктура робочого шару валків на глибині 10 мм від поверхні серійного виробництва (а, б) і після комплексної обробки (в, г); 100х - а, в; 500х - б, г. Травлено ніталем

Зразки чавуну після комплексного оброблення відрізнялися підвищеною дисперсністю матриці і трохи збільшеним вмістом кількості аустеніту [59, 125]. При евтектоїдному перетворенні аустеніту відбувалося утворення бейніту і мартенситу (рис. 4.4 в, г), завдяки легуванню чавунів нікелем в межах 3,76-3,8% [144].

У міру видалення від поверхні первинна структура чавунів приймала грубіший характер (рис. 4.5), при перетворенні аустеніту разом з голчастими продуктами з'являвся тонко диференційований перліт. Кількість диференційованого перліту поступово збільшувалася (рис. 4.5 а-г).

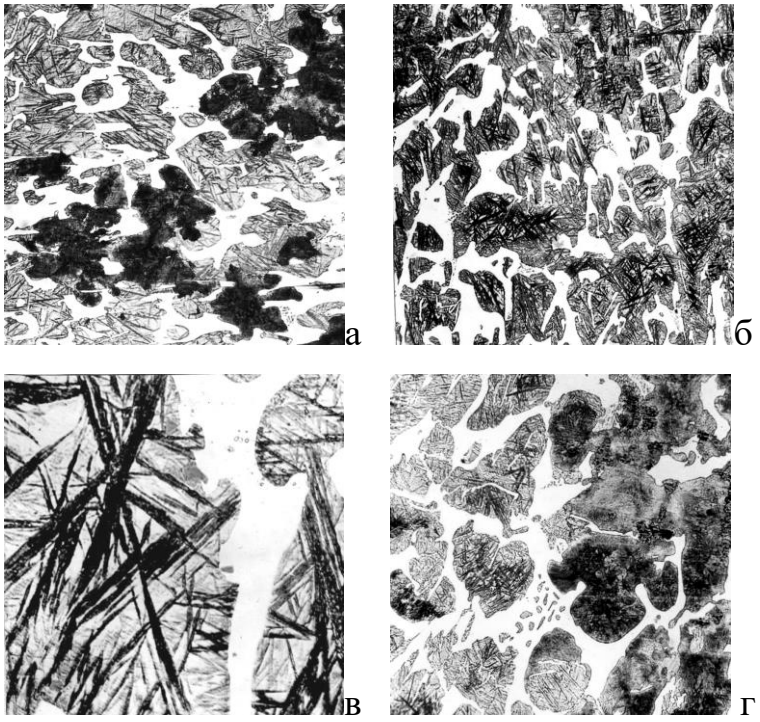


Рис. 4.5. Мікроструктура робочого шару на глибині 20 мм від поверхні валка серійного (а, в) та після комплексної обробки (б, г); 100х; травлено ніталем

Проведені дослідження показали, що у дослідного валка мікротвердість структурних складових була нижчою, ніж у серійного: цементиту, мартенситу і бейніту - на 3-4%, тонко диференційованого перліту - на 7%.

Починаючи з глибини 35-40 мм структура обох валків була однаковою, кількість цементиту зменшувалася, матриця чавуну ставала вже повністю перлітовою (рис.4.6 а). Структура валків на відстані 100 мм від поверхні відповідала структурі сірого перлітового чавуну (рис.4.6 б, в, г).

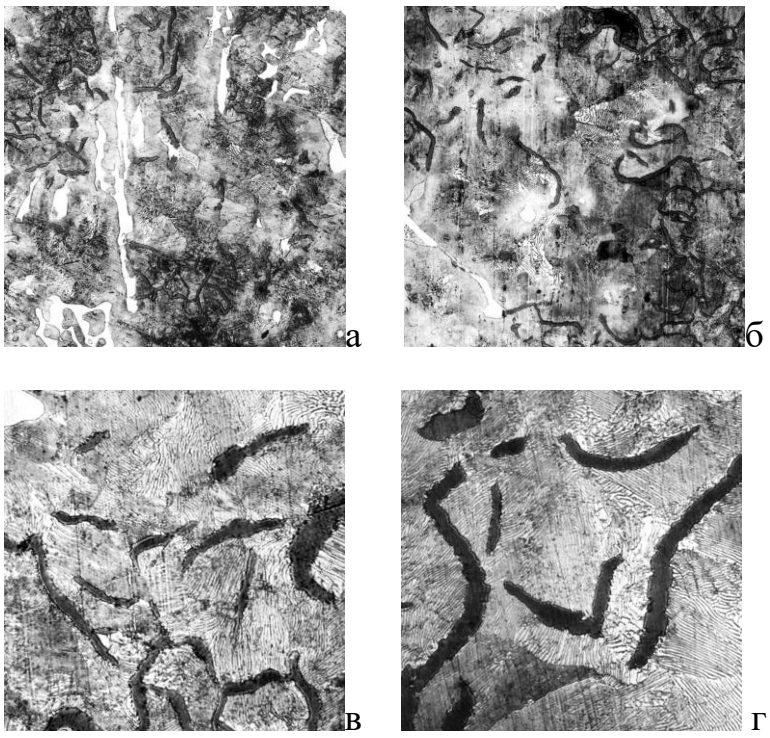


Рис. 4.6. Мікроструктура матеріалу валків на глибині 70-100 мм від поверхні: серійного (а, в) і після комплексної обробки (б, г); 100х - а, б; 500х (в, г); травлено ніталем

Аналіз структури в різних перерізах бочок валків серійного і після комплексної обробки показав, що комплексна обробка призводила до зниження мікротвердості структурних складових, яке, мабуть, викликалося процесами відпустки бейнітно-мартенситної структури матриці [145].

4.2.2 Структура шийок валків

Дослідження мікроструктури матеріалу нижніх і верхніх шийок валків, також як і у випадку з робочим шаром бочок, робили в декількох перерізах від поверхні. Матеріали верхніх шийок досліджуваних валків на відстані 20 мм від поверхні мали структуру половинчастого чавуну (рис.4.7д, 4.8 д). Перліт мав тонку будову, що відповідала балу ПД 0,3 (рис.4.7 ж, 4.8 ж). Нижні шийки, на відміну від верхніх, на відстані 20 мм від поверхні мали структуру сірого перлітового чавуну, в якому фосфідна евтектика була у вигляді невеликих ізольованих ділянок (рис.4.7 а, 4.8 а). Будова перліту відповідала балу ПД 0,5 шкали 8 додаток 3 ГОСТ 3443-87 (рис.4.7 в, 4.8 в). Біля деяких пластин графіту зустрічалися невеликі ділянки фериту (рис.4.8 в). Характер структури на глибині 70 мм не змінювався (рис.4.7 б, г; 4.8 б, г).

Дослідження структури на глибинах 35-70 мм показало, що цементит майже повністю зникав, шийки придбавали структуру сірого перлітового чавуну, в яких зрідка зустрічалися ізольовані ділянки фосфідної евтектики з платинами цементиту, що примикають до них (рис.4.7 е, 4.8 е). Будова перліту характеризувалася балом ПД 0,5 (рис.4.7 з, 4.8 з).

Порівняльний аналіз структури нижніх і верхніх шийок двошарових валків серійного виробництва і дослідного показав, що комплексна обробка не приводила до значних структурних змін.

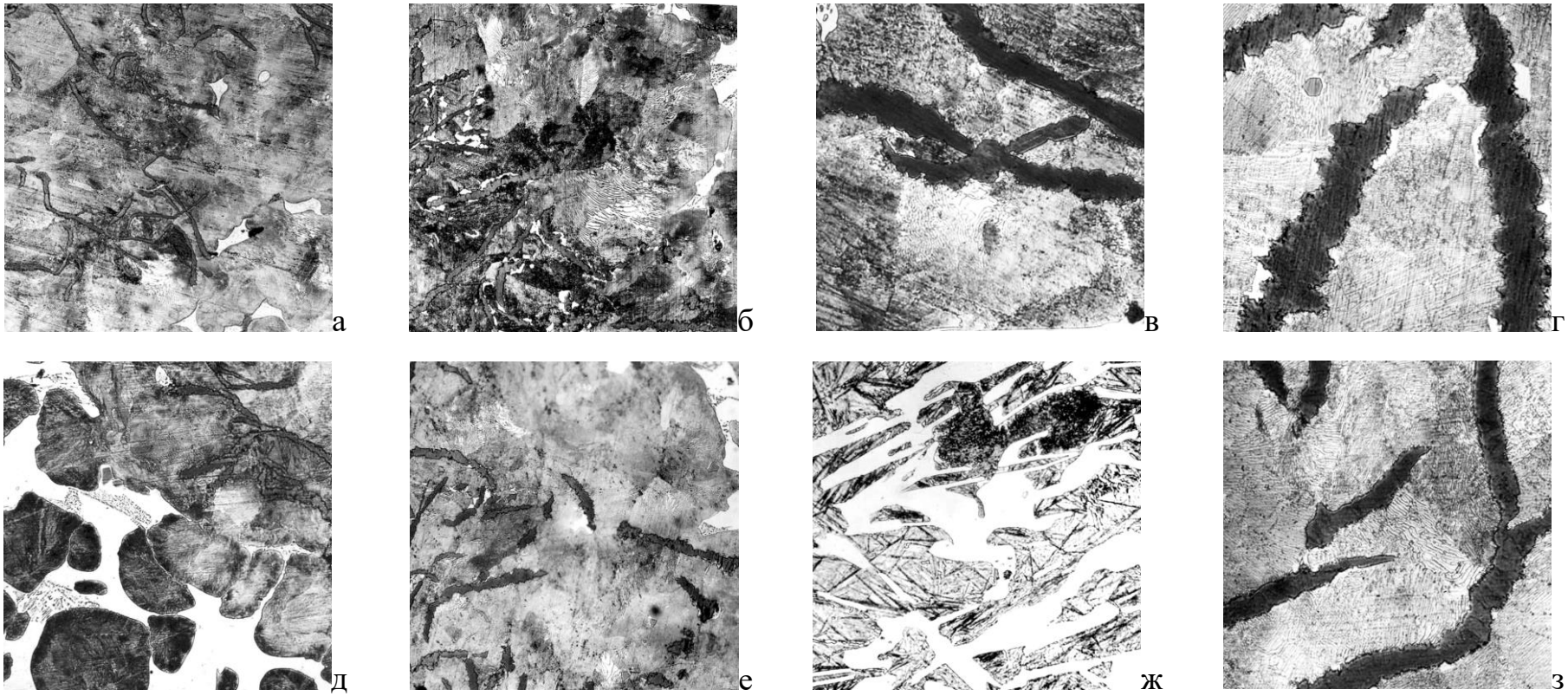


Рис.4.7. Мікроструктура чавуну нижніх (а-г) і верхніх (д-з) шийок серійного валків на відстані 20мм (а, в, д, ж) і 70мм(би, г, е, з). Травлено ніталем. Збільшення Х100 (а, би, д, е), Х500 (у, г, же, з).

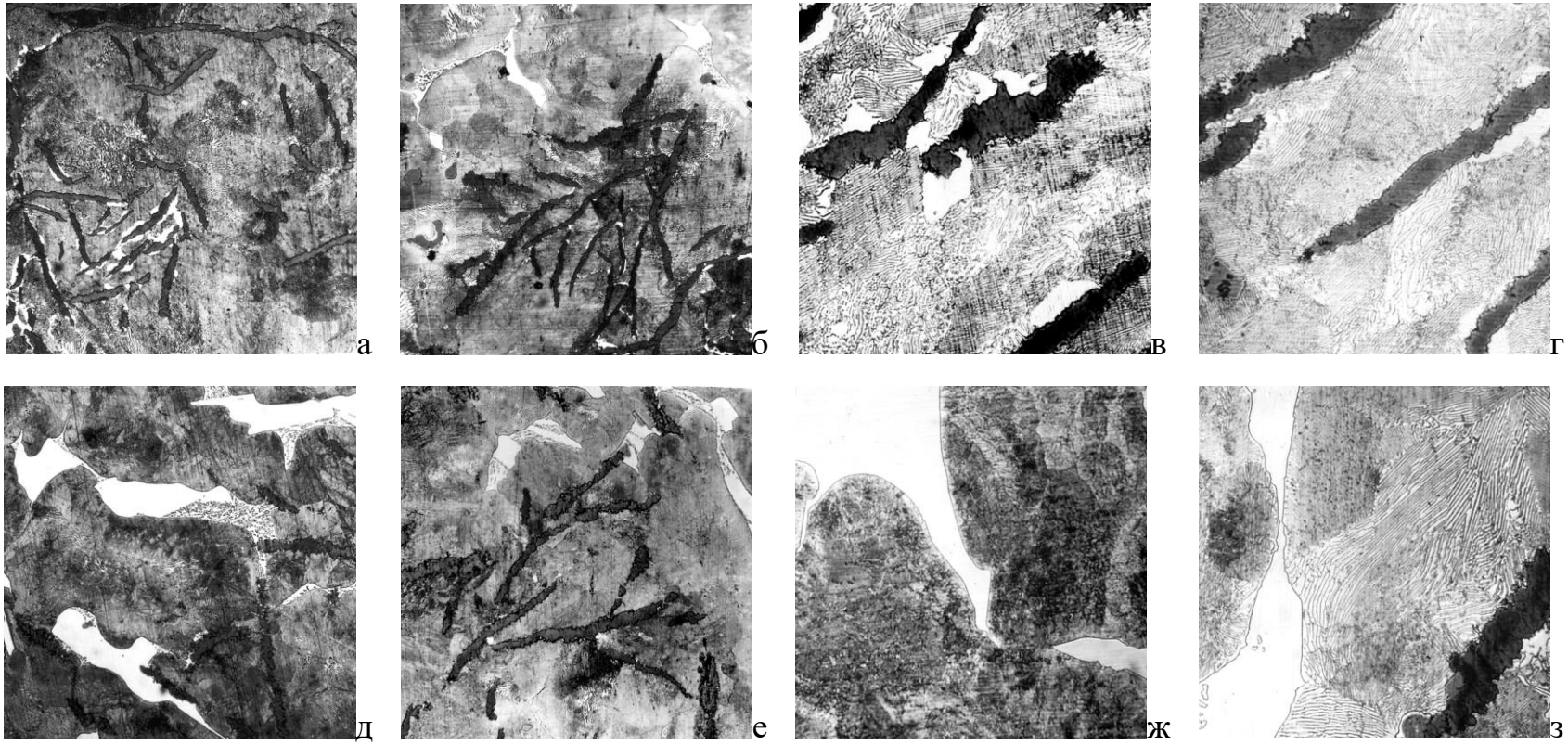


Рис.4.8. Мікроструктура чавуну нижніх (а-г) і верхніх (д-з) шийок дослідного валка після комплексної обробки на відстані 20мм (а, в, д, ж) і 70 мм(б , г, е, з). Травлено ніталем. Х100 (а, би, д, е), Х500 (у, г, же, з)

4.2.3 Механічні властивості

Узагальнені результати досліджень механічних властивостей матеріалу валків серійного і дослідного приведені в табл. 4.3 - 4.5 і на рис.4.9 - 4.11.

Таблиця 4.3

Механічні властивості по глибині бочок валків

Відстань від поверхні, мм	Механічні властивості матеріалу бочок валків					
	Серійного виробництва			Після комплексної обробки		
	$\sigma_в$ Н/мм^2	KCU, кДж/м^2	НВ	$\sigma_в$ Н/мм^2	KCU, кДж/м^2	НВ
10	470	0,20	568	475	0,23	543
30	434	0,25	421	446	0,25	403
50	429	0,29	274	431	0,32	278
70	423	0,29	246	426	0,32	243

Таблиця 4.4

Механічні властивості по глибині нижніх шийок валків

Відстань від поверхні, мм	Механічні властивості матеріалу шийок валків					
	Серійного виробництва			Після комплексної обробки		
	$\sigma_{изз}$ Н/мм^2	KCU, кДж/м^2	НВ	$\sigma_{изз}$ Н/мм^2	KCU, кДж/м^2	НВ
10	243	0,20	311	240	0,20	298
30	201	0,34	228	215	0,32	222
50	216	0,39	217	208	0,35	214
70	215	0,39	210	219	0,39	210

Таблиця 4.5

Механічні властивості по глибині верхніх шийок валків

Відстань від поверхні, мм	Механічні властивості матеріалу шийок валків					
	Серійного виробництва			Після комплексної обробки		
	$\sigma_{изз}$ Н/мм^2	KCU, кДж/м^2	НВ	$\sigma_{изз}$ Н/мм^2	KCU, кДж/м^2	НВ
10	216	0,39	218	222	0,42	222
30	227	0,39	215	212	0,39	219
50	221	0,39	214	219	0,39	214
70	216	0,39	210	250	0,42	214

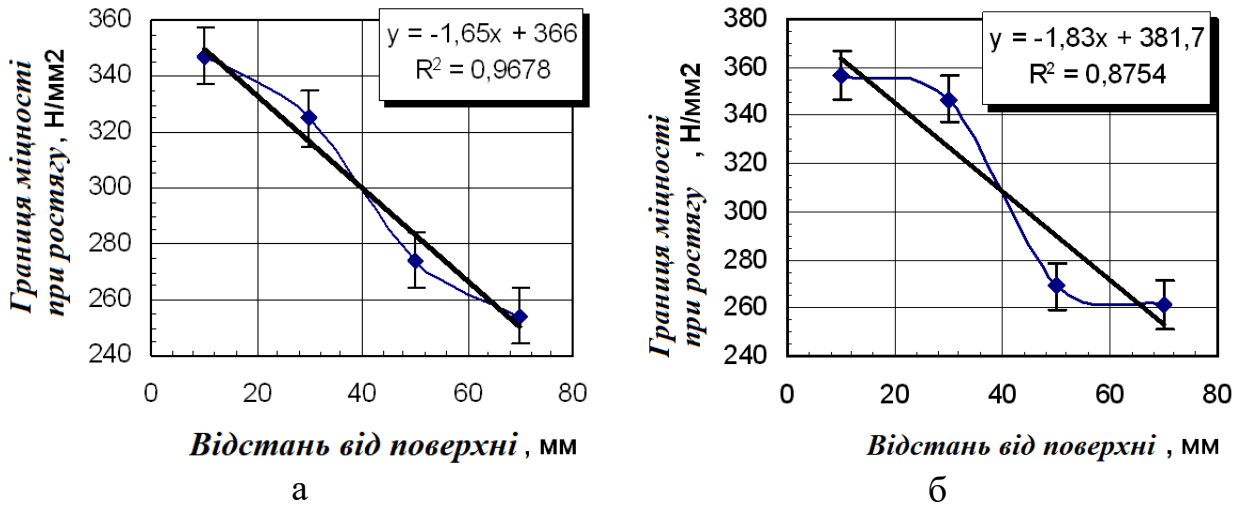


Рис.4.9. Границя міцності при розтягу по бочках валків серійного виробництва (а) та після комплексної обробки (б)

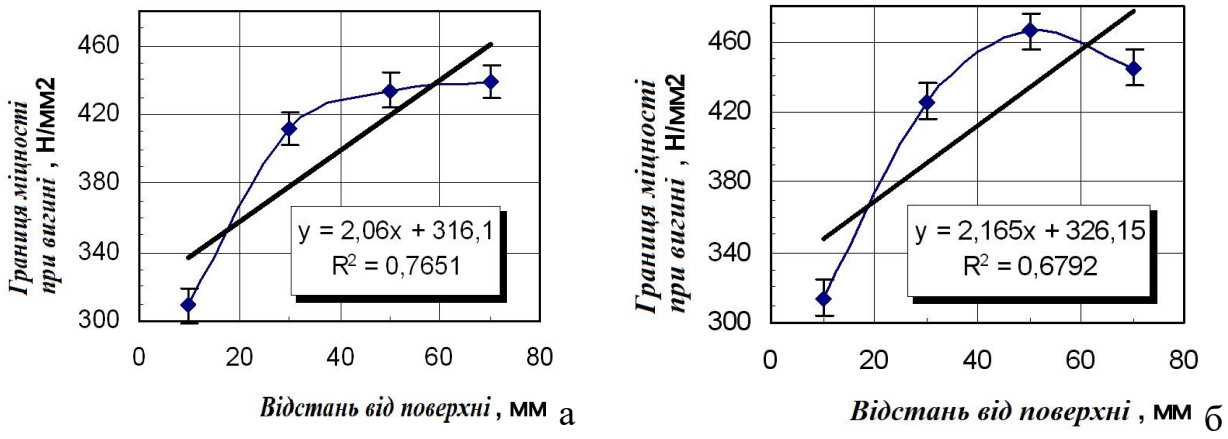


Рис.4.10. Границя міцності при вигині по нижніх шийках валків серійного виробництва (а) та після комплексної обробки (б)

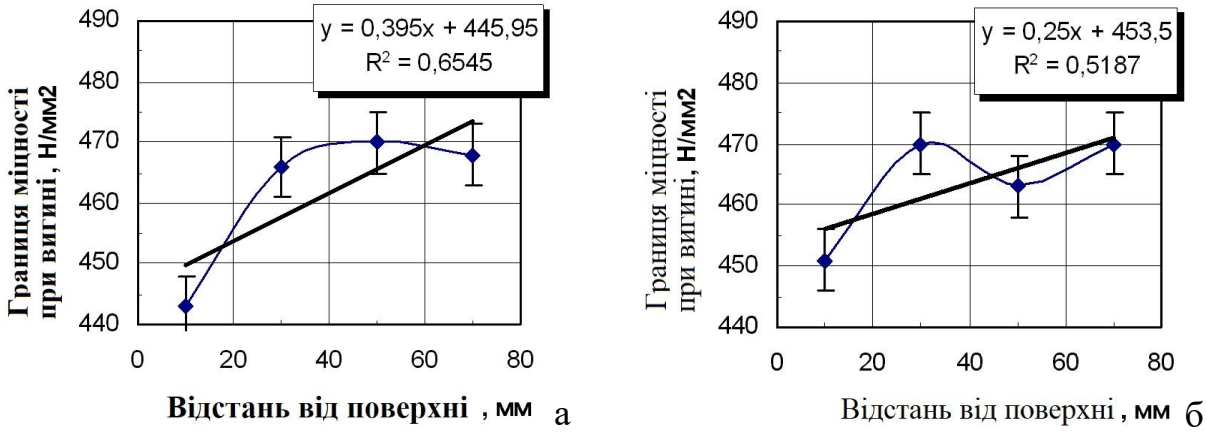


Рис.4.11. Границя міцності при вигині по верхніх шийках валків серійного виробництва (а) та після комплексної обробки (б)

Проведені дослідження показали, що матеріал дослідного валка (після комплексної обробки) у порівнянні з серійним на відстані 10-30 мм від поверхні бочки мав підвищені механічні властивості. Так, границя міцності при розтягу $\sigma_в$ була більшою на 3-7%, границя міцності при вигині σ_u - на 2-3, а ударна в'язкість $a_к$ - на 4-15% [146-147]. На глибині 50-70 мм ці показники не змінювалися [59].

Аналіз твердості бочок дослідного валка в порівнянні з серійним показав, що твердість практично твердість практично не змінювалася. У верхній шийці комплекснообробленого валка, на відстані 10мм від поверхні, твердість знижувалася, в порівнянні з серійним на 4%, а у інших перерізах шийок обох валків механічні властивості практично не змінювалися.

4.2.4 Термостійкість

Дослідження впливу комплексної обробки валків на характер мікроруйнування їх робочого шару проводили методом термоциклування зразків, вирізаних з валків серійного виробництва і дослідного.

Після проведення перших трьох термоциклів в досліджуваних зразках від валків серійного і після комплексної обробки з'являлася подовжня макротріщина, яка перетинала усю поверхню шліфа (рис.4.12 а, в).

Крім того, з'являлися мікротріщини, не пов'язані з макротріщинами, які поширювалися по цементиту, іноді перетинаючи тонкі дендритні гілки (рис.4.12 б, г). При термоциклуванні відбувалася відпустка мартенситу і бейніту, скупчення дрібних зерен цементиту, що виділялися при цьому, наслідували голчастий характер первинної структури (рис.4.12 б, г).

При збільшенні числа термозмін до 100 в досліджуваних зразках відбувався розвиток сітки макротріщин (рис.4.12 е, з). Крім того, з'являлося багато мікротріщин, не пов'язаних з макротріщинами (рис.4.12 д, ж). Питома протяжність тріщин в зразку від дослідного валка складала 0,33см$^{-1}$, а серійного - 0,42см$^{-1}$, що свідчило про поліпшення термостійкості на 27%.

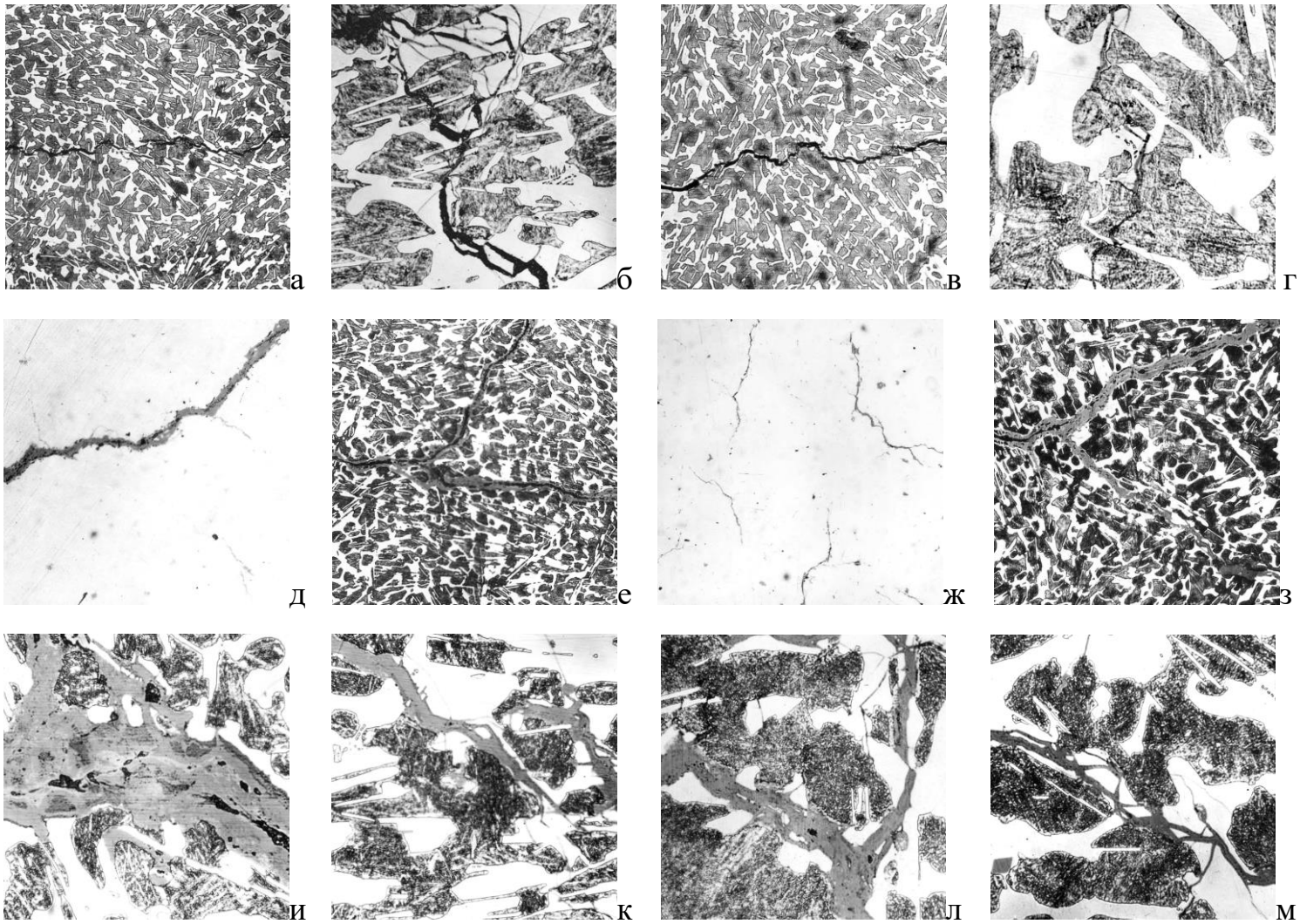


Рис.4.12 - Мікроструктура зразків від робочого шару серійного (а, б, д, е, и, к) и комплексно обробленого валків (в, г, ж, з, л, м) виконання ЛПХНд-71, після перших трьох (а-г) і 100 (д-м) термоциклів: д,ж – не травлено;
100х – а, в, д, е, ж, з; 500х – б, г, и, к, л, м

Після 100 термозмін в структурі матриці відбувалася часткова коагуляція зерен цементиту, що виділилися. У чавуні серійного валка в розташуванні цих зерен зберігався неправильний характер первинної бейніто-мартенситної структури (рис.4.12 і, к), а в комплексно обробленого - явище неправильності бейнто-мартенситної структури зникало (рис.4.12 л, м).

4.3 Вдосконалення хімічного складу валкового чавуну

Проведений аналіз стійкості чавунних прокатних валків показав, що значна частина (до 30%) валків виходять з ладу передчасно по поломкам, що пояснюється , в основному, їх низькою міцністю [144].

Розроблений склад дослідного чавуну [148] для виробництва прокатних валків з підвищеними характеристиками зносостійкості і міцності, що є актуальним завданням сучасного виробництва. Хімічний склад і отримані значення зносостійкості і міцності чавуну приведений в таблиці 4.6.

Для оцінки властивостей запропонованого чавуну і його структурного стану у порівнянні із базовим чавуном, отримали експериментальні чавуни.

Були застосовані наступні шихтові матеріали: чавун переробний ПВК1, ПВК2, ПВК3 ДСТУ 3133-95; чавун ливарний Л1, Л2 ДСТУ 3132-95; чавун валковий ЧВ-1, ЧВ-2 ГОСТ 1465-80; лом сталі 1А, 2А, 3А ГОСТ 2787-75; феросиліцій ФС75 ГОСТ 1415-91; феромарганець ФМн78, ФМн70 ДСТУ 3547-97.

Експериментальні плавки проводили в індукційній печі з кислою футеровкою, вага шихти 40 кг. Після розплавлення шихти потужність печі знижували до 30-40% від максимальної, зчищували шлак періоду плавлення, замі-ряли температуру. Модифікувальні елементи (церій, ітрій, лантан, неодим, диспрозій) завантажували у ківш перед випуском металу. Церій вводили у вигляді фероцерію, ітрій та диспрозій – металевими, лантан і неодим – у вигляді лантан-неодимової лігатури такого складу, мас.%: (лантан+неодим) 45, кремній 40, кальцій 0,4; залізо – решта.

Таблиця 4.6

Хімічний склад і властивості запропонованого та базового чавуну

Сплав	№ вар	Вміст хімічних елементів, мас.%									Властивості			
		C	Si	Mn	Ce	Y	La	Nd	Dy	Fe	Твердість HSD	Границя міцності, МПа		Зносостій-кість, г
												σ_B^p, МПа	$\sigma_B^{виг}$, МПа	
Чавун, що пропо-новано	1	3,5	1,8	0,8	0,04	0,02	0,04	0,03	0,02	решта	63	460	610	0,039
	2	3,5	0,8	0,8	0,04	0,04	0,04	0,05	0,07	«	65	475	620	0,030
	3	2,8	1,8	0,5	0,05	0,04	0,04	0,03	0,02	«	64	465	615	0,035
	4	3,8	0,8	0,5	0,04	0,02	0,05	0,03	0,07	«	64,5	470	620	0,037
	5	3,1	1,3	0,6	0,05	0,03	0,05	0,04	0,02	«	64	460	615	0,035
	6	3,15	1,3	0,6	0,05	0,03	0,04	0,04	0,05	«	64,5	470	620	0,038
	7	3,1	1,3	0,6	0,05	0,03	0,04	0,04	0,07	«	65	475	625	0,030
Чавун базо-вий	8	3,4	1,6	0,8	0,04	0,02	0,06	0,03	-	«	62	455	605	0,041
	9	3,1	1,3	0,6	0,06	0,05	0,04	0,03	-	«	62	450	570	0,042

Чавуни при температурі 1500 ± 5°С випускали у ківш з необхідним навантаженням модифікаторів та при досягненні температури 1300-1340°С заливали у кокільні форми. Виливки мали розміри: діаметр 50, висота 200 мм. З цих виливків вирізали зразки для хімічного аналізу, металографічних досліджень, виміру твердості, визначення границь міцності при вигині та розриві та зносостійкості.

Модифікування диспрозієм призводить до зміни типу евтектики, а саме до отримання пластиноподібної замість ледебуритної, а також до збільшення дисперсності матриці, що у свою чергу сприяє збільшенню зносостійкості і міцності. При концентраціях менее0, 02% кристалізація ледебуриту повністю не зупиняється, а при змісті більше 0,07% в структурі виділяється значна кількість неметалічних включення, які знижують зносостійкість чавуну. Таким чином введення диспрозію у відповідних концентраціях, виправдовує очікування пригнічення виділення ледебуритної евтектики. Крім того обробка сплаву комплексом РЗМ у вказаних межах сприяє кристалізації чавуну по метастабільній системі, що дозволяє збільшити міцність. Як видно (див. табл. 4.6), поставлена мета досягнута. Зносостійкість запропонованого чавуну вище, ніж відомого на 6-28, а міцністні властивості – на 4-6%.

4.4 Комп'ютерне моделювання технологічних параметрів лиття двошарового валка

На сьогодні на багатьох вітчизняних і зарубіжних підприємствах для проектування і моделювання ливарної технології виготовлення литих деталей широко застосовується пакети комп'ютерних програм, зокрема SolidWorks і LVMFlow.

Авторами [149-151] було виконано моделювання заповнення форми рідким чавуном і охолодження прокатних валків, проте заливання валка виконувалася одним сплавом. Нині технічні можливості завдання початкових параметрів моделювання в програмі LVMFlow і їй подібних не дозволяє вико-

нати заливання легованим сплавом, а потім промивання чавуном іншого складу.

У роботі необхідно виконати комп'ютерне моделювання заливки і охолодження двошарових прокатних валків з наступним контролем градієнта температур в різних перерізах валка і форми в процесі охолодження.

Виконані нижче дослідження проводили для двошарового прокатного валка з робочою поверхнею його бочки з легованого і модифікованого чавуну і шийками і серцевиною з сірого чавуну, залитого методом промивання [59, 152].

Метою комп'ютерного моделювання був вибір оптимальних технологічних рішень до стадії виробництва пробного лиття, а також визначення температурних полів, часу охолодження до утворення необхідного шару металу на робочій поверхні бочки валка, моменту подачі промивного металу і часу витримки валків у формі.

У роботі виконали моделювання з двоступінчастим завданням початкових параметрів заливання і двома стадіями моделювання.

Перша стадія моделювання включала наступне:

1) створення 3D-моделей в програмі SolidWorks для моделювання згідно прийнятої технології, а саме валок з припусками, прибутками, стояком, воронкою ливника, кокіль, опока верху, опока низу, формувальна суміш верхньої опоки, формувальна суміш нижньої опоки і стояка (рис.4.13);

2) імпорт розроблених деталей в програму LVMFlow;

3) завдання початкових параметрів моделювання, а саме:

- розмір розрахункового осередку - 26 мм;

- сплав А-ХНмд, що заливається -1, що відповідає за механічними і фізичними властивостями легованому і модифікованому чавуну досліджуваного валка;

- матеріал кокілю - сірий чавун;

- матеріал опоки верху і низу - сталь марки Ст.45;

- матеріал порожнини форми - повітря;

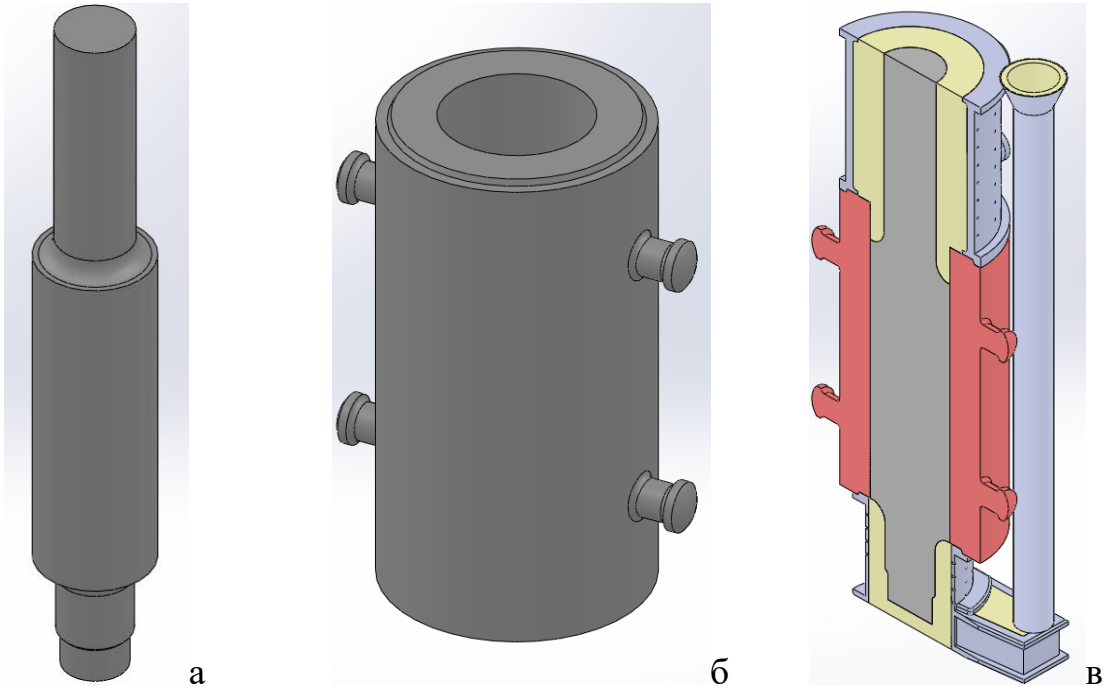


Рис. 4.13. 3D - моделі, розроблені в програмі SolidWorks: а) модель валка з припусками на механічну обробку і прибутком; б) модель кокілю; в) форма ливарні у зборі: валок, кокіль, форма верху/низу, опоки верху/низу

- матеріал форми - піщано-глиниста формувальна суміш;

- товщина боксу, що формує простір моделювання від крайніх точок опок 25мм;

- струмінь - гравітаційна заливка;

За допомогою виконаного моделювання заливки і охолодження спроектованого валка визначили час з моменту початку заливки, коли на робочій поверхні бочки валка сформувався затверділий шар чавуну рівний 17 мм, яке склало 4 мін 25 с.

На цьому етапі були зроблені виміри температури і геометричних розмірів основних температурних градієнтів (рис.4.14 і 4.15).

Цей етап був найбільш відповідальним, оскільки на основі отриманих в нім даних були створені 3D-модели для виконання другого етапу моделювання.

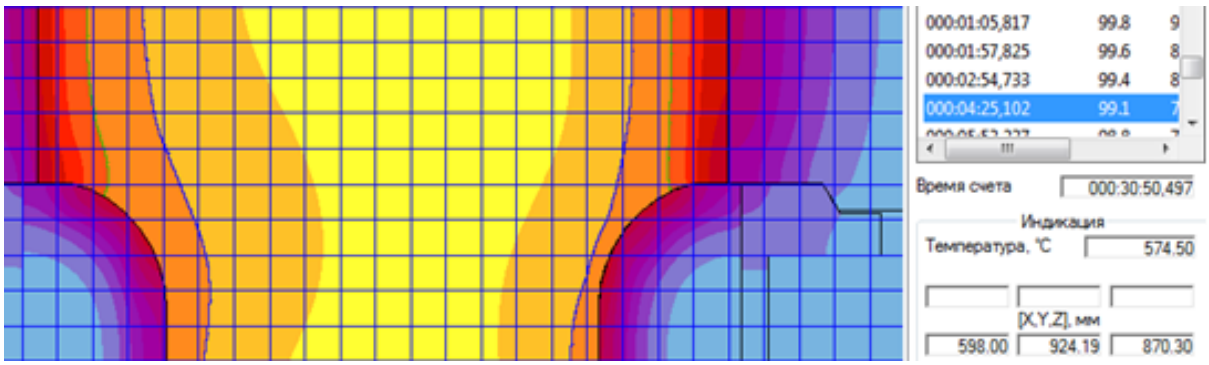
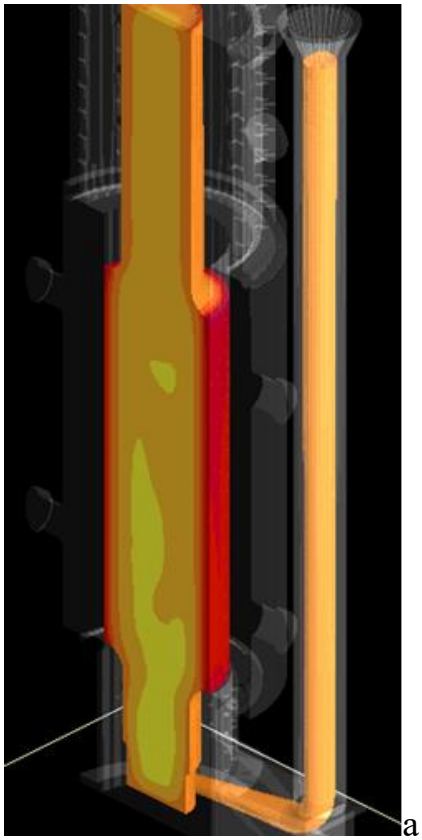
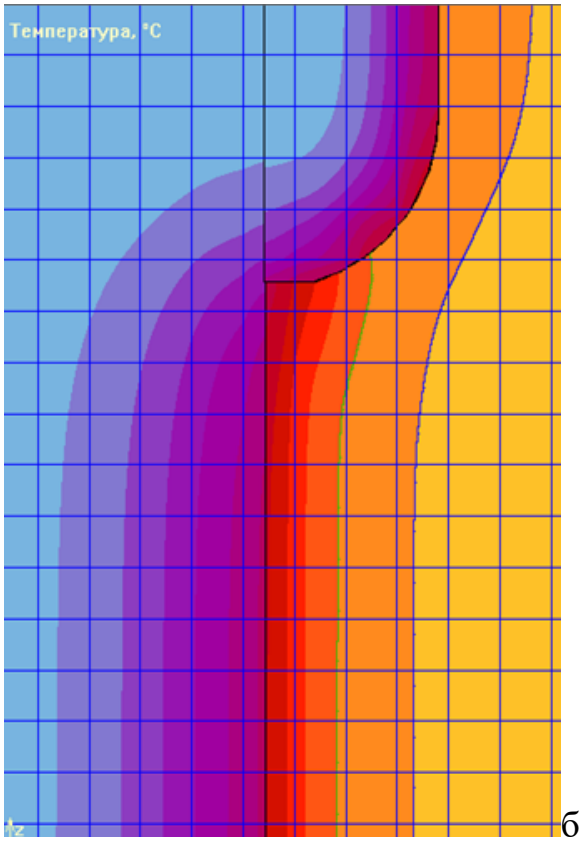


Рис.4.14. В графі «Індикація/Температура, ºС» відображена температура точки, на яку наведений курсор «миші» ця температура 574,5 ^{0}C, виміряна на поверхні кокілю, відстань від границі метал-форма 15мм, координати точки відображені в графові «[X, Y, Z], мм»



а



б

Рис.4.15. Температурне поле валка після закінчення 4мин 25с від моменту заливки. На підставі отриманих даних розроблені 3D-модели
а - переріз по осі валка; б - вигляд зверху

Друга стадія моделювання включала наступне.

1. Створення 3D-моделей на основі отриманих розмірів градієнтів температур після закінчення 4мин 25с від моменту початку заливки. Для кожного градієнта була розроблена відповідна 3D-модель. Моделі опок залишили без змін (рис.4.16).

2.Імпорт розроблених деталей в програму LVMFlow (рис.4.17).

3.Завдання початкових параметрів моделювання (рис.4.18), а саме:

1) розмір розрахункового осередку 26мм;

2) сплав сірого чавуну, що заливається, відповідає за механічними і фізичними властивостями чавуну досліджуваного валка;

3) матеріал усіх моделей кокілю з сірого чавуну, температура шарів наступна (від границі метал-кокіль): 773, 678, 583, 488, 393, 298ºС, інша поверхня кокілю 108ºС;

4) матеріал зовнішньої частини валка із сплаву А-ХНмд-1, який встиг кристалізуватися опісля 4мин 25с від початку заливки форми. Температура шарів наступна (від межі метал-кокіль до центру валка) : 917, 1056 і 1206ºС, відповідно;

5) матеріал опоки верху і низу - сталь Ст.45, температура 20ºС;

6) матеріал усіх моделей форми - піщано-глиниста формувальна суміш, температура шарів наступна (від межі метал-форма): 773, 678, 583, 488, 393, 298ºС, інша поверхня кокілю 70ºС ;

7) матеріал порожнини форми повітря з температурою, що відповідає температурі рідкого сплаву на момент завершення першого етапу моделювання опісля 4мин 25 з від початку заливки;

8) товщина боксу, що формує простір моделювання від крайніх точок опок 25мм;

9) струмінь - гравітаційна заливка.

За результатами другої стадії моделювання можна з високою точністю судити про теплові процеси, що відбуваються під час кристалізації валка (рис.4.19) [152].

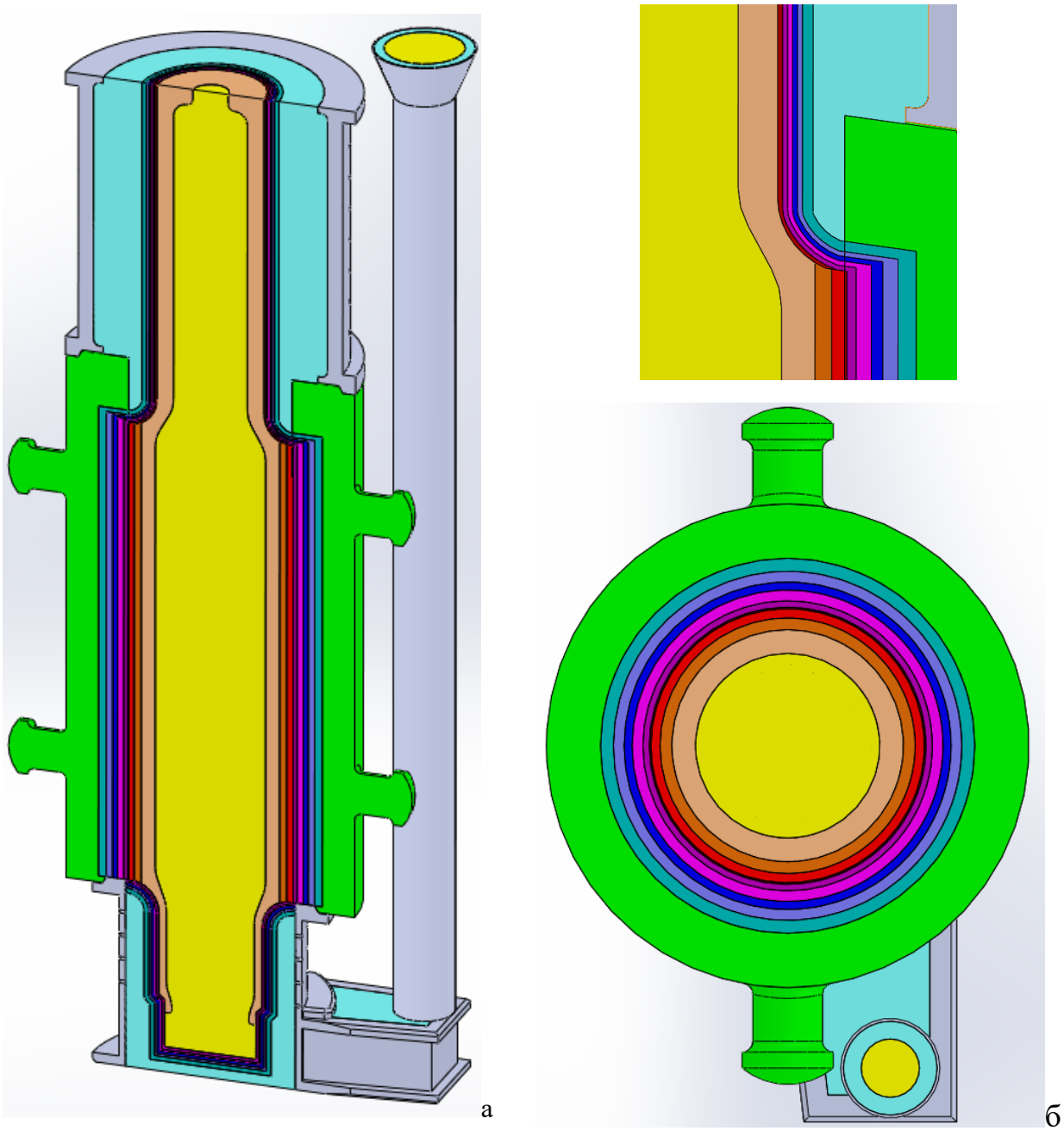
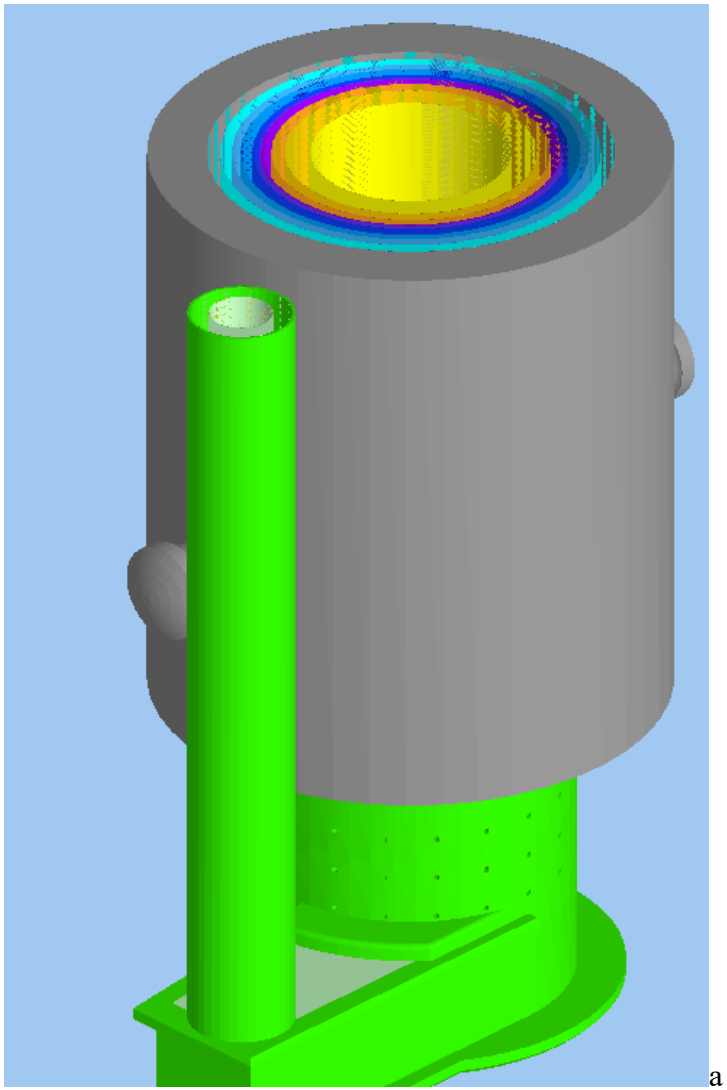
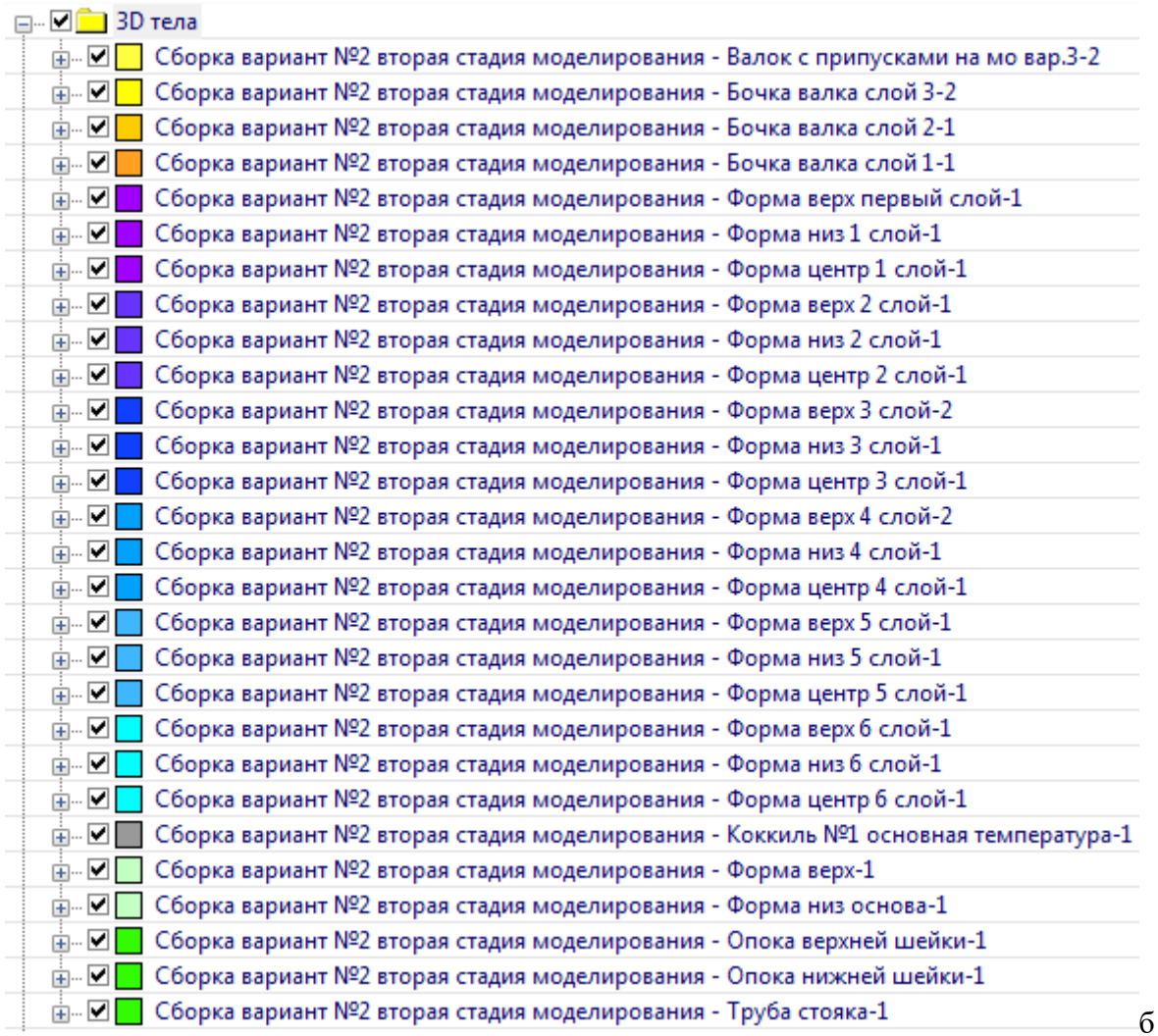


Рис.4.16. Для другого етапу моделювання на підставі наведених вище градієнтів температурних полів розроблені 3Dмодели. Окремі деталі (шари) зібрані у зборку і готові до імпорту в програму LVMFlow:
а - переріз по осі валка; б - вид зверху



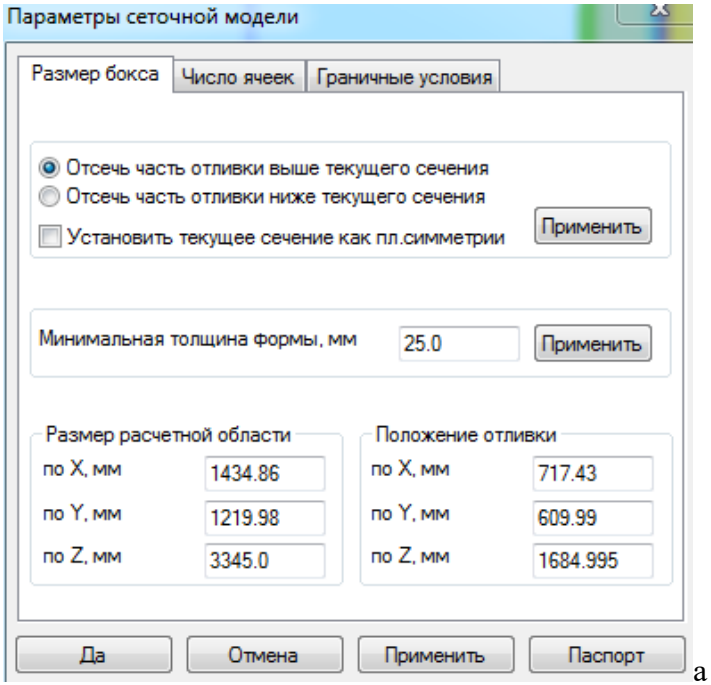
а



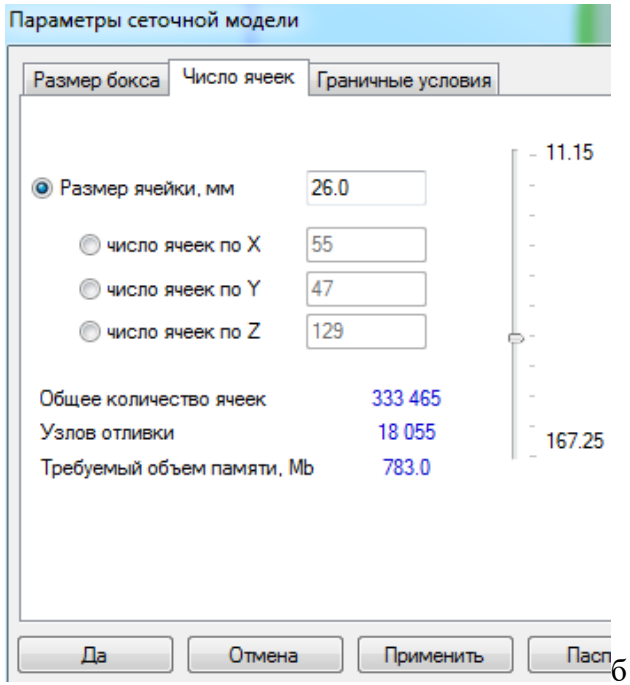
б

Рис.4.17. Імпорт 3D моделей. Кожному шару з однаковою температурою заданий один колір при імпорті:

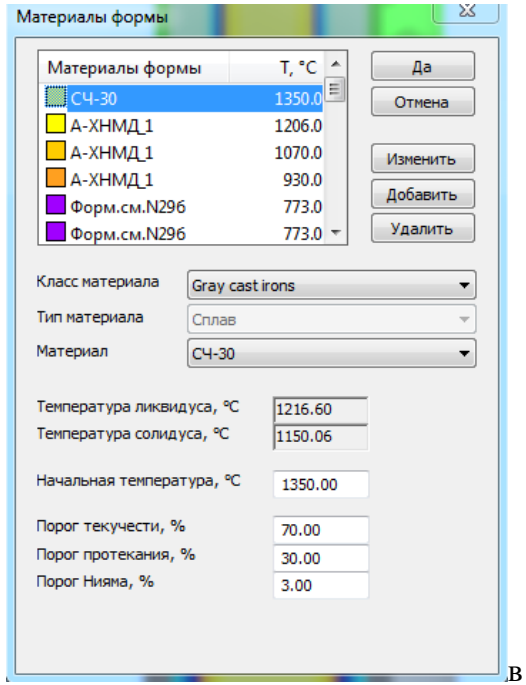
а - 3D відображення зборки; б - дерево побудови зборки



а



б



в

а - розмір боксу (області) в об'ємі якої виконується моделювання;

б - завдання параметрів раніше заданого боксу : розмір одного осередку, загальна кількість осередків, вузлів відливання і об'єму пам'яті, необхідного для виконання розрахунків;

в - завдання матеріалів форми: клас матеріалу, тип матеріалу, матеріал, початкова температура при запуску моделювання, для кожного шару задаються власні параметри форми

Рис.4.18. Початкові установки, завдання параметрів моделювання

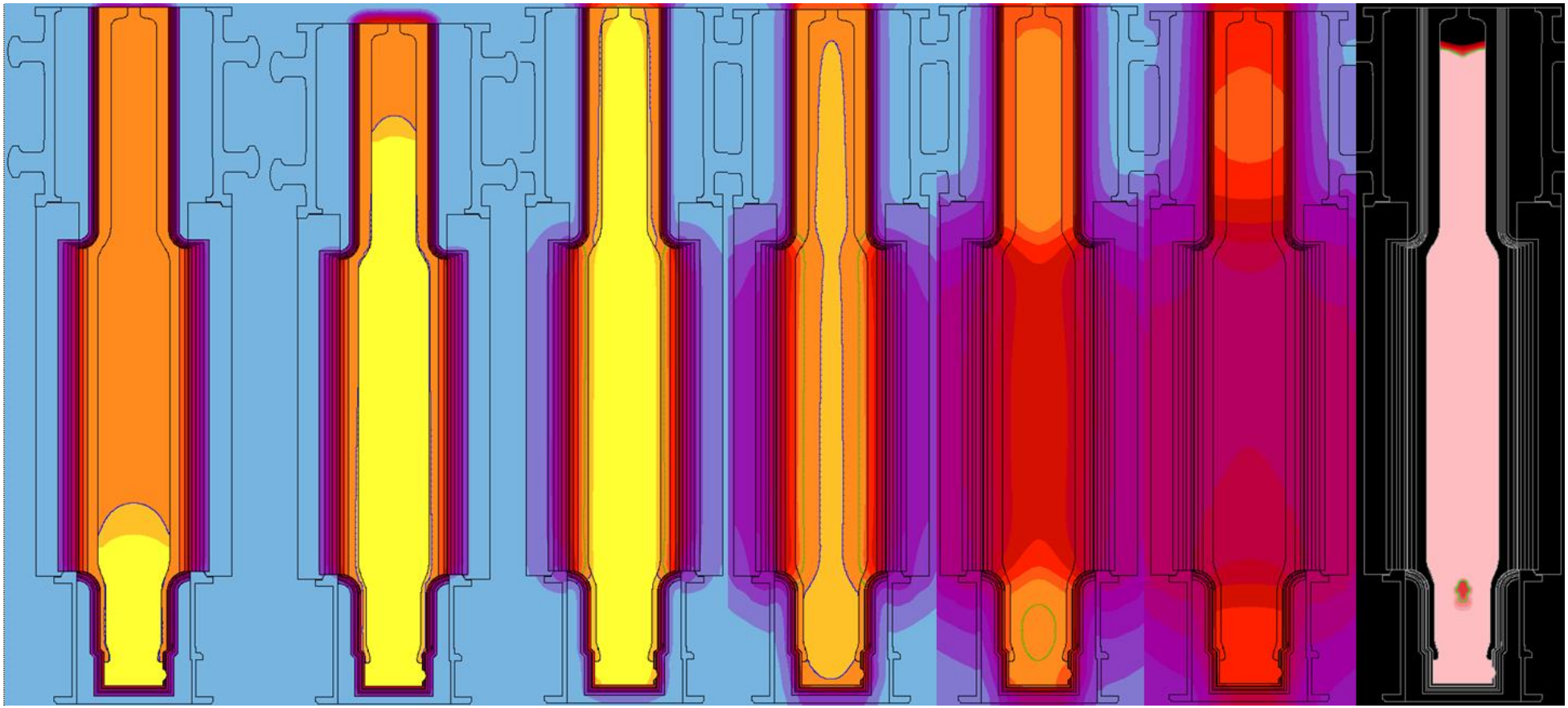


Рис.4.19. Процес моделювання: максимальна температура в надливній частині 1070ºС через 160хв.; контроль утворення усадочних дефектів

Моделювання технологічного процесу виготовлення виливків способом лиття в комбіновані форми показало, що усадкова раковина утворювалася в нижній шийці валка. Причиною її утворення було збільшення швидкості кристалізації у верхній частині нижньої шийки форми, що контактує з кокільною частиною.

4.5 Висновки за розділом 4

1. Отримані результати власних досліджень показали доцільність застосування для модифікування чавуну робочого шару двошарових прокатних валків комплексного модифікатору на основі рідкоземельних металів та термічної обробки литих заготовок валків і їх позитивний вплив на фізико-механічні та службові властивості.

2. На підставі експериментальних досліджень і комп'ютерного моделювання був розроблений удосконалений технологічний процес виготовлення двошарових прокатних валків, що включає позапічне модифікування розплаву робочого шару чавуну рідкісноземельними металами і термічну обробку литих заготовок.

3. Аналіз структури в різних перерізах бочок валків серійного і дослідного показав, що комплексна обробка призводила до зменшення мікротвердості структурних складових, яке було пов’язано з процесами відпуску бейнітно-мартенситної структури матриці. Порівняльний аналіз структури нижніх і верхніх шийок двошарових валків серійного виробництва і дослідного показав, що комплексна обробка не приводила до значних структурних змін.

4. Проведені дослідження показали, що матеріал дослідного валка (після комплексної обробки) у порівнянні з серійним на відстані 10-30 мм від поверхні бочки мав підвищені механічні властивості: границя міцності при розтягу $\sigma_в$ була більшою на 3-7%, границя міцності при вигині σ_u - на 2-3%, а ударна в’язкість $a_к$ - на 4-15%. На глибині 50-70 мм ці показники не змінювалися.

Твердість матеріалу бочки дослідного валка в порівнянні з серійним практично не змінювалася. У верхній шийці комплексно обробленого валка, на відстані 10мм від поверхні, твердість знижувалася в порівнянні з серійним на 4%, а в інших перерізах шийок обох валків твердість практично не змінювалася.

5. Після 100 термозмін в структурі матриці відбувалася часткова коагуляція зерен цементиту, що виділилися. У чавуні серійного валка в розташуванні цих зерен зберігався неправильний характер первинної бейніто-мартенситної структури, а в комплексно обробленого - явище неправильності бейнто-мартенситної структури зникало. Термостійкість матеріалу робочого шару дослідного валка була на 27% більшою.

6. Моделювання технологічного процесу виготовлення виливків способом лиття в комбіновані форми показало, що усадкова раковина утворювалася в нижній шийці валка. Причиною її утворення було збільшення швидкості кристалізації у верхній частині нижньої шийки форми, що контактує з кокільною частиною.

7. Розроблена ефективна методика моделювання заливки валка методом промивання з повною відповідністю усіх процесів, що відбуваються, у формі.

8. Таким чином, виробниче випробування удосконаленого технологічного процесу виробництва двошарового прокатного валка виконання ЛПХНд-71 діаметром 500 мм показало поліпшення фізико-механічних та службових властивостей його матеріалу.

Матеріали розділу опубліковані у [30, 59, 125, 143, 144, 146-148, 152].

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ЛИТТЯ ВИЛИВКІВ З ВИСОКОЛЕГОВАНИХ МОДИФІКОВАНИХ ЧАВУНІВ

5.1 Характеристика об'єкту дослідження

Об'єктом дослідження було обрано виливок «Корпус насосу» креслення № НКУ5.00.01 (Додаток Б) на прикладі насоса модифікації 5ГрК-8, що традиційно виготовляється зі зносостійкого хромистого чавуну марки ИЧХ28Н2. Ряд вітчизняних заводів (ПАТ «ДНІПРОВАЖМАШ», ПАО «РЕМГІРМАШ») для виробництва таких насосів застосовує окрім ИЧХ28Н2 також сплав марки ИЧ210Х33Г3.

Загальний вигляд насосу виконання ГрУ, модифікацією якого є насос 5ГрК-8 (1ГРТ 160/31,5 за номенклатурою Бобруйського машинобудівного заводу, схематично наведений в додатку В, загальний вигляд та технічна характеристика на рис. 5.1 та табл. 5.1.

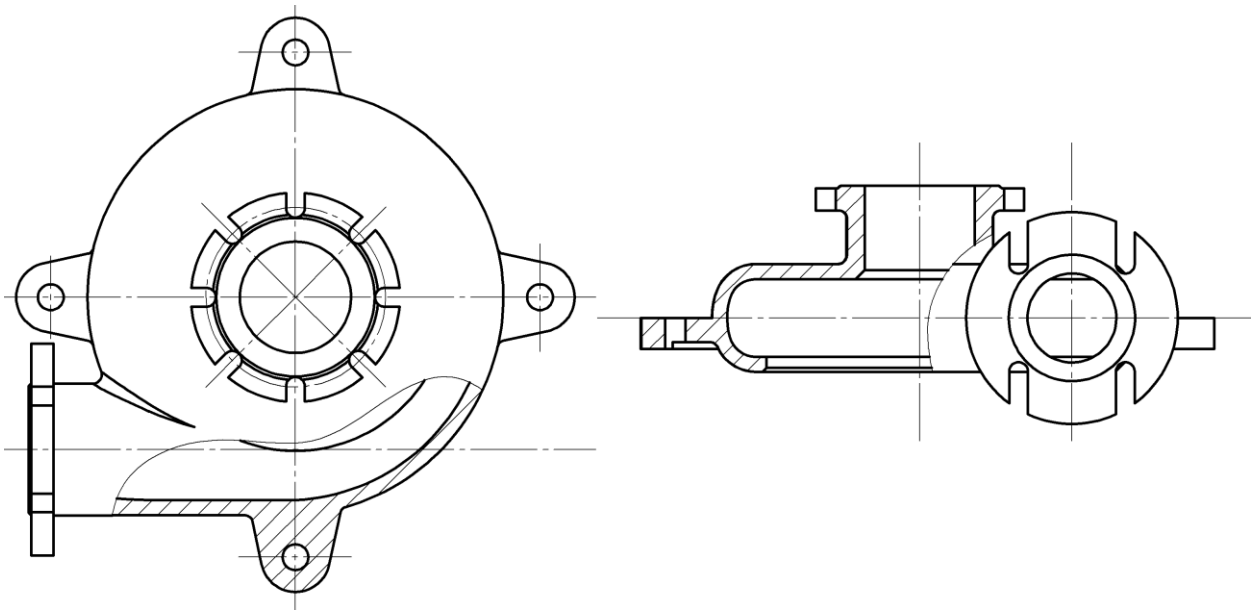


Рис. 5.1. Загальний вигляд корпусу насосу

Таблиця 5.1

Технічні характеристики багерного насосу 5ГрК-8

Найменування показника	Значення показника
Марка	5ГрК-8 (1ГрТ 160/31,5)
Подача води в сальник, $м^3$/год	6,0
Подача повітря, $м^3$/год	160
Напір, м	31,5
Густина/температура	1,3т/$м^3$ / 5…70°С
Діаметр колеса, мм	320
Габаритні розміри (LxBxH), мм	1250x685x688
Маса, кг	443
Нормативний документ	ТУУ 26-06-1367-94

Корпус насосу є швидко зношуваною деталлю насосу багера для перекачування високоабразивної пульпи, який застосовується на гірничо-збагачувальних і гірничо-металургійних підприємствах, теплоелектростанціях, технологічних лініях збагачення корисних копалин. В процесі експлуатації насос схильний до інтенсивного гідроабразивного зносу. Умови експлуатації таких насосів ускладнюються тим, що в процесі перекачування рідкої пульпи вони схильні до ударного навантаження кавітації, коли локалізовані мікрооб'єми робочої поверхні насосу піддаються багатократним гідравлічним ударам, в результаті яких відбувається руйнування деталі. Важливим чинником дії є і корозійний вплив абразивної маси .

Таким чином, враховуючи комплексний вплив перерахованих чинників, деталь «Корпус насосу» в процесі експлуатації схильна до практично усіх видів зносу, що представляє великий інтерес отримання сплаву з оптимальними техніко-економічними показниками.

5.2. Хімічний склад дослідних чавунів

Застосування високохромистих заевтектичних чавунів в сучасній промисловості прийнято вважати менш прийнятним, з причини того, що в структурі заевтектичних чавунів при кристалізації утворюються великі голкоподібні карбіди, що знижують зносостійкість і, більшою мірою міцність виливків. Вміст хрому понад 29% при вмісті вуглецю більше за 3% призводить до утворення таких карбідів. Відомо, що при вмісті хрому в межах 12-20% спостерігається максимальна зносостійкість високохромистих сплавів. Вищезгадане підтверджує доцільність проведення дослідження чавунів зі зменшеним вмістом хрому, ніж в чавуні ИЧХ28Н2, але модифікованих модифікатором, що містить РЗМ [122, 153].

Досліджувані сплави виплавляли в дуговій печі моделі ДСП3, 5А. В якості шихтових матеріалів застосовували повернення виробництва ИЧХ28Н2, ливарний і переробний чавуни, а також феросплави (див. табл. 2.1). Виготовлення виливків корпусів насосу здійснювали способом лиття у піщану форму.

Крім того, у даній роботі з серії промислових плавок, виконаних методом переплавлення, по розплавленню повернення виробництва і продукції минулої корисний термін експлуатації отриманої з гірничо-збагачувальних комбінатів, встановлено, що хімічний склад чавуну, усереднено, відповідає наступному (умовне позначення усереднений склад «УС») (табл. 5.2).

Слід зазначити, що досить низький вміст хрому і нікелю, викликаний наявністю в брухті, отриманому з гірничо-збагачувальних комбінатів зносостійких чавунів інших марок (які відсортувати і виключити скрутно і недоцільно) і фактичним нижчим вмістом цих елементів в зношених деталях, чим регламентується для ИЧХ28Н2. Отриманий хімічний склад є близьким до багатьох існуючих промислових марок високохромистих зносостійких чавунів, і перекликається в змісті багатьох елементів, проте повністю не співпадає ні з одним з них (див. табл. 1.8).

Таблиця 5.2

Склад чавуну по розплавленню повернень виробництва ИЧХ28Н2

Сплав	Зміст елементів, %									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu
«УС»	2,4-3,1	0,9-1,1	0,4-0,7	0,02-0,08	0,03-0,08	15-17	1,0-1,5	0,1-0,15	0,006-0,012	0,15-0,4

У розділі 1 даної роботи було показано, що визначення властивостей і характеристик як високохромистих немодифікованих, так і модифікованих складів представляє науковий і практичний інтерес з причини значно меншої вартості виробництва такого чавуну і відсутності необхідності робити енергоємну термообробку - загартування (як для сплаву ИЧХ28Н2).

Метою цього розділу роботи було дослідження порівняльного впливу трьох модифікаторів різних складів (табл. 5.3) на структуру та властивості високохромистих дослідних сплавів [154] та сплаву серійного виробництва ИЧХ28Н2 (табл. 5.4). Модифікатор ФС15РЗМ10Т15М25 був спеціально розроблений для випробування на таких виливках як «корпус насосу» [155].

Таблиця 5.3

Хімічний склад дослідних комплексних модифікаторів

Позначення модифікатора	Зміст хімічних елементів, %							
	Si	Mg	РЗМ	Ti	Cu	Al	Li	Fe
ФС15РЗМ10-Т15М25	15	–	10	19	26	0,8	–	решта
ФС30РЗМ30	44	–	32	-	-	9	–	решта
КМг9	55	13,2	–	–	–	–	0,51	решта

Модифікатор у кількості 1,0 мас.% подрібнювали до фракції 2…7 мм з присутністю пилоподібної фракції 5…8% і завантажували на дно заливального ковша перед випуском в нього розплаву.

Таблиця 5.4

Хімічний склад дослідних чавунних сплавів

Позначення сплаву	Зміст хімічних елементів, %													Ступінь евтектичності $S_э$
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	Mg	РЗМ	Fe	
Дослідні сплави														
1	2,81	0,90	0,62	0,055	0,053	15,94	1,07	0,144	0,0077	0,3362	–	–	решта	0,89
1м	2,83	1,0	0,60	0,045	0,05	15,70	1,01	0,112	0,01	0,66	–	0,05	решта	
2	3,0	0,94	0,64	0,031	0,039	16,50	1,12	0,1115	0,007	0,335	–	–	решта	0,96
2м	3,01	1,0	0,63	0,027	0,035	16,240	1,10	0,103	0,008	0,316–	–	0,11	решта	
3	2,42	0,96	0,484	0,06	0,0472	15,818	1,40	0,145	0,006	0,2	–	–	решта	0,79
3м	2,47	1,21	0,485	0,043	0,04	15,523	1,41	0,14	0,012	0,186	0,03	–	решта	
Серійний сплав														
ИЧХ28Н2	2,85	1,1	0,65	0,08	0,1	29	2	–	–	–	–	–	решта	1,19

Примітка: Ступінь евтектичності чавунів розраховували за формулою [2]:

$$Sэ= \%3/4,3-0,3(\%Si)+0,03(\%Mn) - 0,07(\%Ni) - 0,05$$

При виготовлення зразків для дослідження мікроструктури та властивостей дослідних сплавів модифікування розплавів здійснювали в заливальному ковші місткістю 60 кг.

Досліджувані зразки виготовляли в стрижневих і піщаних формах (рис. 5.2). У стрижнях виконували порожнини, що відповідають формі стандартних зразків за ГОСТ 1497-84, а у піщано-глинистих формах отримували циліндричні зразки діаметром 15 і завдовжки 200 мм. Вибивання зразків здійснювали після охолодження їх до температури 70…30°С.

Рис. 5.2. Виливки зразків для дослідження структури і властивостей дослідних сплавів: в центрі зразки, що одержані в стрижневій, праворуч і ліворуч – в піщаних формах

5.3. Мікроструктура досліджуваних високохромистих сплавів

Відомо, що структура хромистих чавунів залежить від змісту легуючих елементів, проте в основному вона має наступну будову: в евтектичних колоніях, що є бікристалом, міститься значна кількість аустеніту, який є пластичною основою колонії, і карбідна фаза, яка робить на колонію армуючи дію за рахунок високотвердих карбідів тих, що мають гексагональну форму $(Cr, Fe)_7C_3$. Засадничим у формуванні структури і складу евтектики є співвідношення і зміст двох основних елементів вуглецю і хрому, від зміни яких

об'єм карбідної фази може варіюватися в межах 30…60%. Інші легуючі елементи також чинять істотний вплив на формування структури високохромистих чавунів.

Мікроструктура досліджуваних сплавів складалася з аустеніту, фериту, карбідів M_7C_3 і $M_{23}C_3$. Дендрит карбідної фази, що має значну твердість, фактично проростаючи в аустенітній пластичній основі, чим і обумовлюється висока зносостійкість досліджуваних сплавів.

Досліджувані сплави мали різний ступінь евтектичності: сплав №1 і № 3 - доевтектичні, сплав №2 - евтектичний, а сплав, використовуваний для серійного виробництва виливків, марки ИЧХ28Н2 - заевтектичний (див. табл. 5.2).

Як вказувалося раніше заевтектичні зносостійкі чавуни мають істотний недолік - великі первинні карбіди і як наслідок низькі механічні властивості, крихкість. Проте цей тип чавунів представляє великий інтерес для реального виробництва високим вмістом твердих і зносостійких карбідів M_7C_3. Подрібнення структури евтектичного чавуну дозволили значно підвищити механічні і експлуатаційні властивості сплаву.

У досліджуваних сплавах евтектичні карбіди виділялися у складі колоній компактної форми. Первинний і евтектичний аустеніт насичувалися вуглецем і легуючими елементами. Присутність легуючих елементів, таких як марганець, нікель і мідь підвищувало стійкість аустеніту, проте не дозволило отримати аустенітну структуру.

Для модифікування сплаву 1 застосовували комплексний модифікатор ФС15РЗМ10Т15М25 (див. табл. 5.3). Структура модифікованого сплаву 1м була дрібнішою і рівномірною дендритною (рис. 5.3). Первинні карбіди M_7C_3 в порівнянні з немодифікованим сплавом також мали дрібнішу будову. Мікротвердість металевої матриці модифікованого сплаву збільшилася на 12%.

Відомо [2], що кремній не розчиняється в карбідах M_7C_3, а разом з РЗМ перешкоджає росту карбідів, концентруючись переважно на поверхні зростаючих карбідів. Титан також сприяє утворенню додаткових центрів

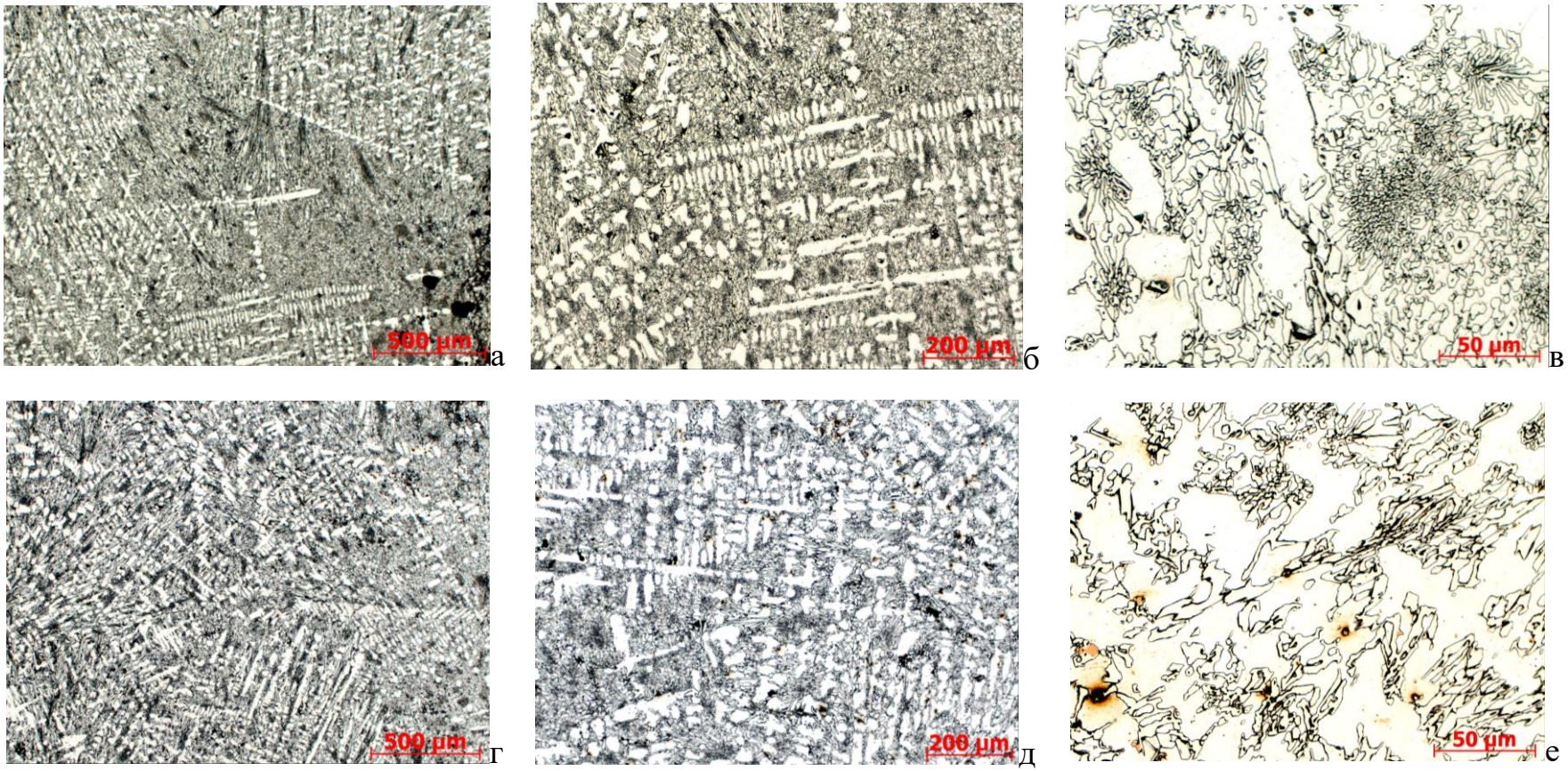


Рис. 5.3. Мікроструктура першої серії дослідних сплавів: сплаву 1– а, б, в, 1м – г, д, е

кристалізації, утворюючи тугоплавкі карбіди TiC, що мають високу мікротвердість.

Підвищення твердості матриці, мабуть, було обумовлене наявністю у складі модифікатора міді і титану. У свою чергу кремній, титан і РЗМ вплинули на морфологію первинних карбідів, розмір карбідів зменшився з 7 мкм в немодифікованому сплаві до 5 мкм – в модифікованому.

Модифікування досліджуваного сплаву 2 проводили комплексним модифікатором ФС30РЗМ30 (див. табл. 5.3). Структура сплаву 2м після модифікування розплаву істотно відрізнялася від немодифікованого стану. У сплаві 2м кількість карбідів була найбільшою, більше 35%. Після обробки сплаву модифікатором розмір первинних карбідів M_7C_3 істотно зменшився з 9 мкм в немодифікованому сплаві до 5 мкм – в модифікованому (рис. 5.4).

Введення РЗМ призвело до зменшення розмірів аустенітного дендриту. Кремній і РЗМ вплинули подібне до того, яке зробив модифікатор ФС15РЗМ10Т15М25 на сплав 1м, перешкоджаючи росту карбідів, тим самим, створюючи дрібнішу і рівномірну структуру [153].

До складу модифікатора окрім кремнію і РЗМ входило 9% алюмінію. При модифікуванні зносостійких хромистих чавунів не слід недооцінювати розкислюючу дію алюмінію. Згідно з дослідженнями [3] алюміній є поверхнево активним елементом, тому він вплинув на розмір дендриту і привів спільно з РЗМ і кремнієм до значного зменшення лінійних розмірів дендритних гілок. Таким чином, наявність у складі модифікатора РЗМ і алюмінію привела до зменшення кількості неметалевих включень, що у свою чергу також повинно позначитися на набутті високих механічних властивостей сплаву 2м.

Модифікування досліджуваного сплаву 3 проводили стандартним комплексним модифікатором, що містить магній (див. табл. 5.3). Мікроструктура сплаву до і після модифікування змінилася (рис. 5.5). Розміри первинних карбідів в модифікованому сплаві 3м були значно меншими, ніж в немодифікованому 3. У складі дослідженого комплексного модифікатора кремній був основним елементом, вплив якого був описаний вище.

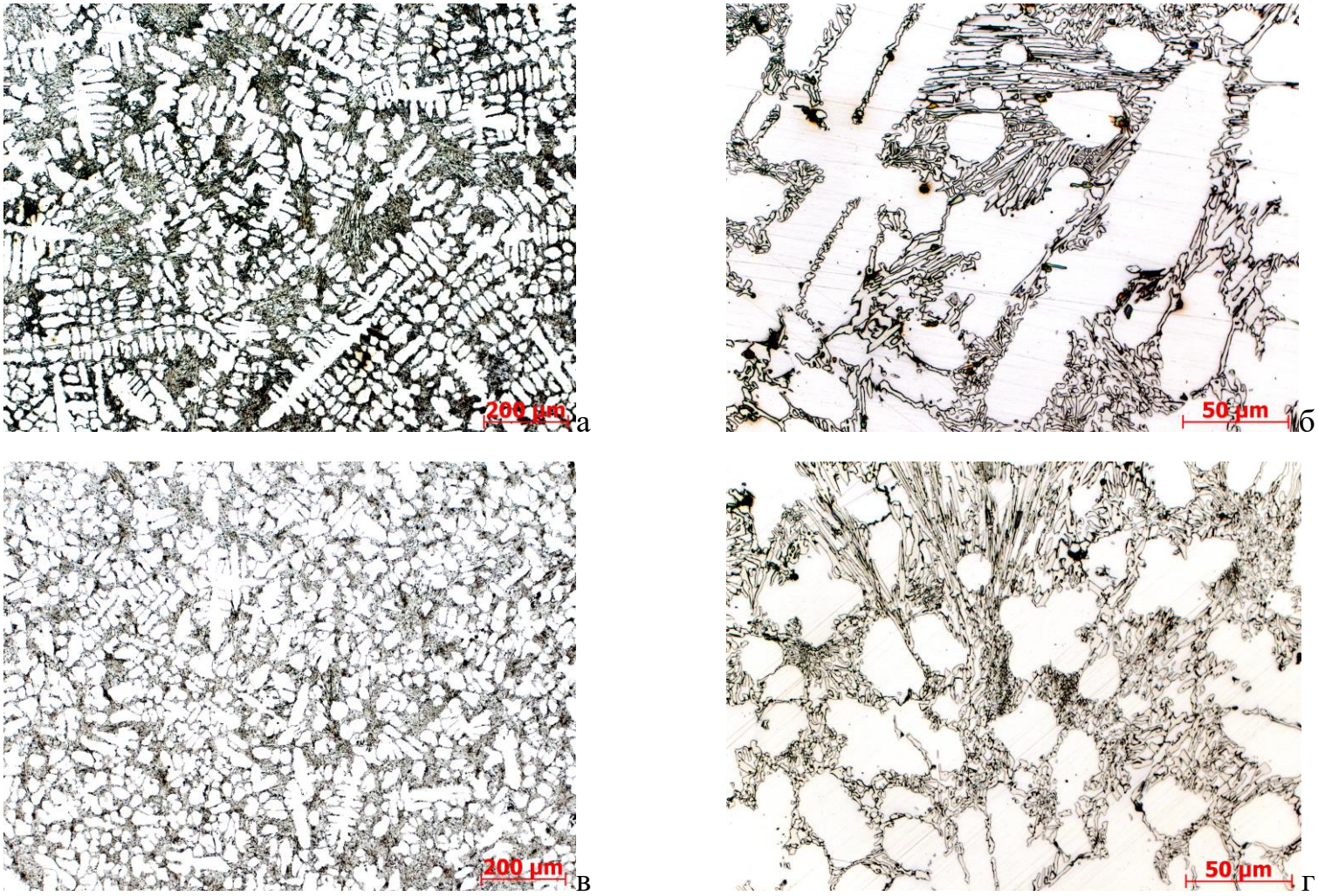


Рис. 5.4. Мікроструктура другої серії дослідних сплавів: сплаву 2– а, б, 2м – в, г

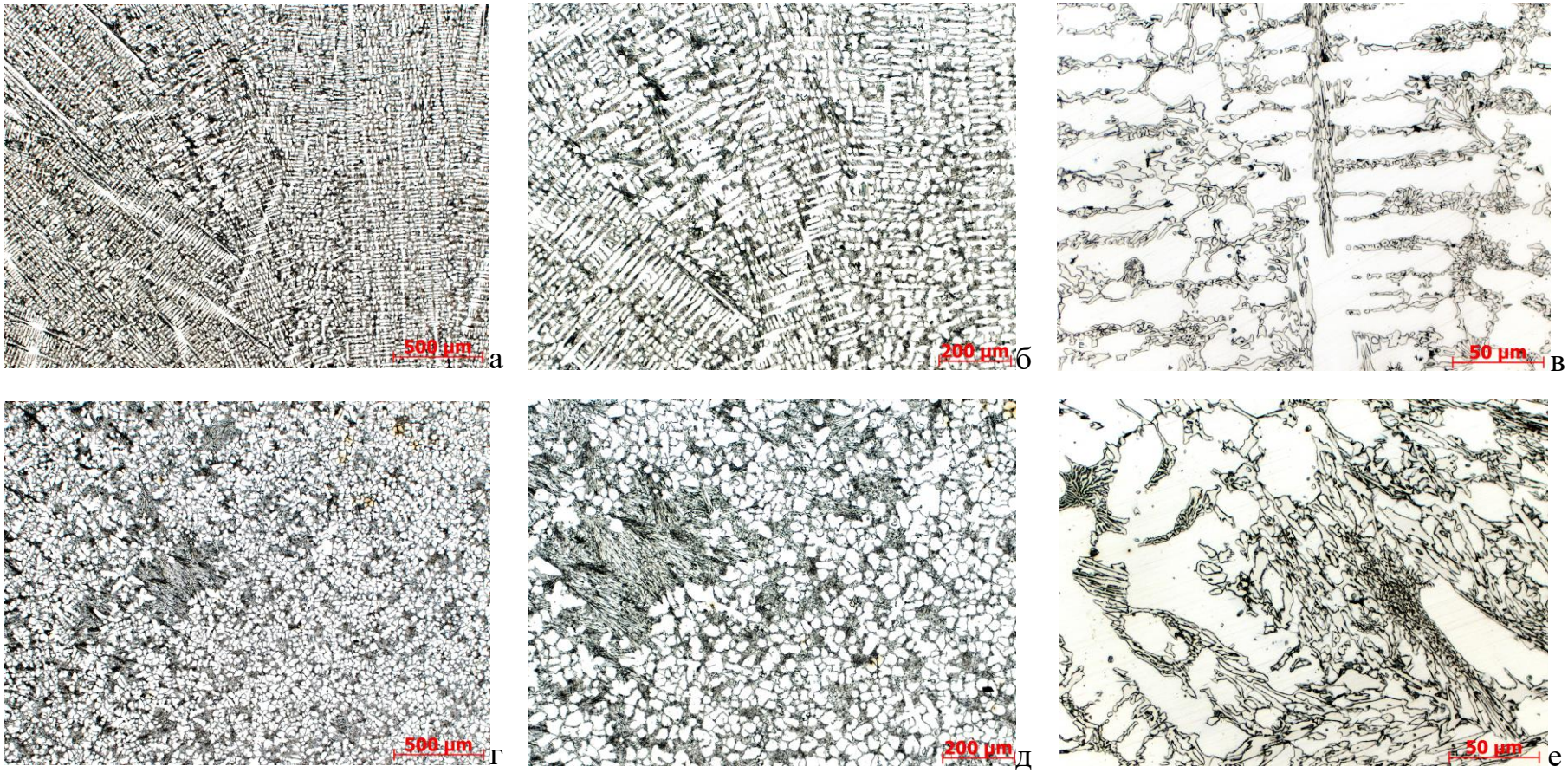


Рис. 5.5. Мікроструктура третьої серії дослідних сплавів: 3– а, б, в, 3м – г, д, е

Ципін І.І. у роботах [12, 15] відмічав, що помітний вплив магнію при модифікуванні чавунних сплавів спостерігається при його вмісті в сплаві в кількості від 0,1%, але не більше 0,4%, тому що більший вміст призводить до зниження позитивного впливу модифікатора. Слід зазначити, що вміст магнію в модифікаторі був малим і істотного впливу на сплав не чинив, крім того, в процесі модифікування спостерігався піроефект.

В процесі виготовлення дослідної партії виливків виявлена підвищена стійкість їх проти гарячих тріщин.

В результаті проведених досліджень встановлено, що кількість карбідної складової в досліджуваних чавунах і кількість хрому в карбідах практично не змінювалася в кожній з проведених серій сплавів, що зіставлялися, і не залежало від типу модифікатора (табл. 5.5).

Таблиця 5.5

Зміст карбідів в структурі дослідних сплавів

№ сплаву	Вміст хімічних елементів, %		Кількість карбідної складової, %	Співвідношення Cr/C	% Cr у карбідах
	C	Cr			
1	2,81	15,94	35,0	5,7	46
1м	2,83	15,70	35,2	5,5	45
2	3,0	16,5	37,7	5,5	44
2м	3,01	16,24	37,7	5,4	43
3	2,42	15,818	30,2	6,5	52,5
3м	2,47	15,523	30,6	6,3	50,5
ИЧХ28Н2	2,85	29	42,7	10,2	60

5.4. Механічні властивості досліджуваних сплавів

Межу короткочасної міцності на розрив визначали за стандартною методикою згідно ГОСТ 1497-84. Спочатку були виготовлені зразки двох типів: завдовжки 72 і 40 мм. Випробування на зразках довжиною 72 мм не показали достовірного результату, оскільки зразки руйнувалися в нехарактерному місці при порівняно невеликих навантаженнях, тому випробування міцності проводили тільки на зразках довжиною 40 мм. Міцність на вигин і ударну в'язкість визначали на великих зразках діаметром 10 і завдовжки 55 мм.

В результаті проведених досліджень (табл. 5.6) показано, що переохолодження, яке супроводжує модифікування, сприяло підвищенню усіх досліджуваних властивостей.

Таблиця 5.6

Механічні властивості зразків з дослідних сплавів і сплаву ИЧХ28Н2

Позначення сплаву	Механічні властивості			
	Межа міцності $\sigma_в$, Н/мм^2	Межа міцності $\sigma_{виг}$, Н/мм^2	Ударна в'язкість KCU, кДж/м^2	Твердість HRC
1	387	994	55	56
1м	450	1082	65	57
2	458	1005	57	55
2м	547	1168	75	57
3	445	974	53	60,5
3м	480	1042	60	60,2
ИЧХ28Н2	370	590	–	46

Значення межі міцності при розтягу у сплаві після модифікування модифікатором ФС30Р3М30 було найбільшим серед трьох модифікованих сплавів – 547 Н/мм^2. У порівнянні з немодифікованими сплавами межа міц-

ності сплавів модифікованих була на 16% більшою у першій дослідній серії, на 20% – у другій серії та 8% – у третій серії дослідів.

Межа міцності при вигині після модифікування сплаву модифікатором ФС30РЗМ30 була найбільшою серед трьох дослідних модифікованих сплавів– 1168 Н/мм^2. У порівнянні з немодифікованими сплавами межа міцності модифікованих сплавів була на 9% більшою у першій дослідній серії, на 16% – у другій серії та 7% – у третій серії дослідів.

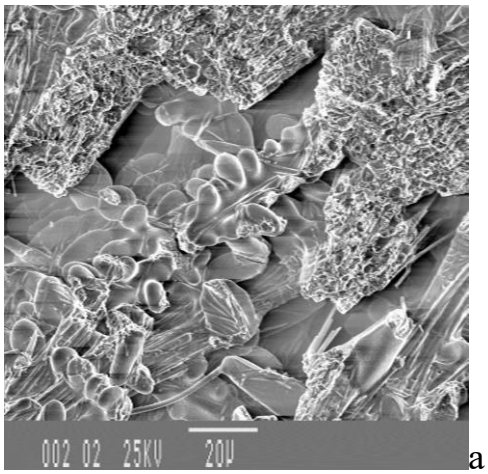
Ударна в'язкість сплаву після модифікування модифікатором ФС30РЗМ30 також серед трьох модифікованих сплавів була найбільшою – 75 кДж/м^2. У порівнянні з немодифікованими сплавами межа міцності модифікованих сплавів була на 19% більшою у першій дослідній серії, на 32% – у другій серії та 13% – у третій серії дослідів.

Таким чином, за силою впливу на дослідні сплави модифікатори, які використовували, можна розмістити у такий спадний ряд: ФС30РЗМ30, ФС15РЗМ10Т15М25, КМг9.

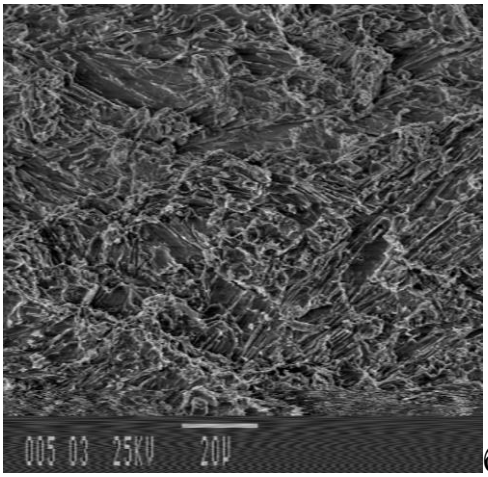
У порівнянні зі сплавом ИЧХ28Н2 середнє значення межі міцності при розтягу модифікованих сплавів трьох дослідних серій було на 33% більшим, а середнє значення межі міцності при вигині – більшим на 86% . Модифікований ФС30РЗМ30 сплав мав міцність при розтягу на 48, а міцність при вигині на 98% більшим у порівнянні зі сплавом серійного виробництва ИЧХ28Н2. Твердість модифікованих сплавів також була вищою за сплав ИЧХ28Н2 на 24…46%.

Фрактограма поверхні зруйнованого зразка з немодифікованого сплаву 2 свідчила про транскристалічний злам по межах великих зерен і по поверхні дендриту, що було викликано грубою будовою структури сплаву (рис. 5.6,а). Таким чином, злам зразків с чавуну немодифікованого складу свідчив про крихке руйнування, в'язке руйнування спостерігалося лише на окремих невеликих ділянках.

У зламі модифікованого зразка 2м, разом з крихким руйнуванням було присутнє й в'язке, тобто, тип руйнування був змішаний. Спостерігався



а



б

Рис. 5.6. Злам зразка сплаву 2 (а) та 2м (б) після проведення механічних випробувань, х600

інтеркристалітний злам по тілу зерна. Також виразно було видно, що в модифікованому зразку була компактніша структура, що викликано більшою кількістю центрів кристалізації (рис. 5.6,б).

5.5. Зносостійкість дослідних сплавів

Відомо, що ріст зносостійкості збільшується зі збільшенням кількості карбідної складової, проте ріст припиняється після досягнення евтектичного складу сплаву. Як вказувалося вище, це пов'язано з наявністю в структурі великих карбідів, які здатні викрошуватися в процесі зносу, тим самим знижуючи зносостійкість хромистого чавуну.

В ході проведених досліджень визначено, що модифікування досліджуваних сплавів комплексними модифікаторами призводить до істотного зниження розмірів карбідів, на підставі чого можна чекати високі показники зносостійкості для чавунів з великим змістом карбідів.

Визначення зносостійкості досліджуваних сплавів здійснювали на установці типу стенду ЛП3-м, розробленого ВНІІПТ «Вуглемаш». Принцип

роботи стенду ЛП3-м полягає в тому, що підготовлені зразки розміщуються в чаші і обертаються в середовищі, що складається з кварцевого піску і води в співвідношенні 2:1 [112, 156]. Подібне середовище дозволяє оцінити зносостійкість сплаву в умовах гідроабразивного зношування, основного типу зносу при експлуатації насосів багерів.

Експериментальні дані, які отримані в ході випробування зносостійкості зразків (табл. 5.7) свідчать про те, що модифіковані сплави мали на 14-

Таблиця 5.7

Дані з визначення зносостійкості дослідних сплавів

Позначення сплаву	1	1м	2	2м	3	3м	ИЧХ28Н2
Зносостійкість, К	8,4	9,8	9,4	11,6	8,6	9,8	6,8

23% більшу зносостійкість, ніж не модифіковані [154]. Слід відмітити, що дослідний модифікований лігатурою ФС30Р3М30 сплав був на 23% більш зносостійким у порівнянні з немодифікованим та – на 70% у порівнянні з серійним ИЧХ28Н2.

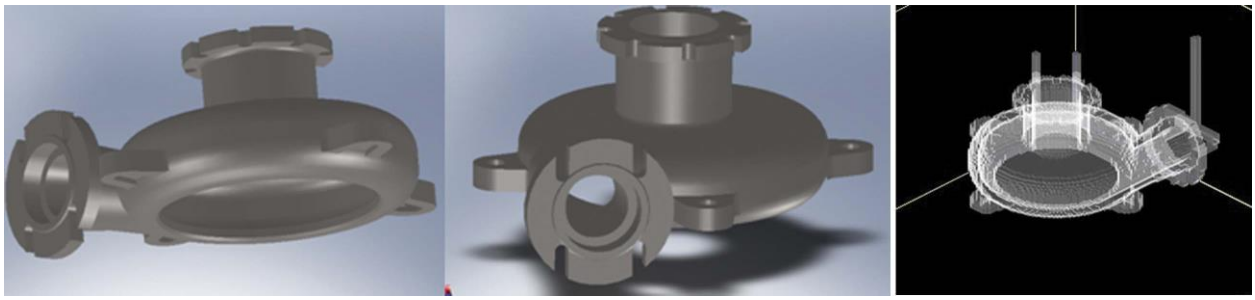
5.6 Розробка технологічного процесу одержання виливка

Для виробництва корпусів насосів застосовують зносостійкий чавун з високим вмістом хрому, при роботі з яким необхідно приділити особливу увагу розробці технологічного процесу, оскільки цей сплав має значну усадку.

Метою підрозділу була розробка основних параметрів технологічного процесу лиття виливка «корпус насоса» з вісокохромистого чавуну: швидкість заливання, температурний режим форми, тривалість витримки до витягання з піщаної форми, маси надливів і деталі з технологічними припусками, розмір ливниково-живлючої системи. Виконання поставленого завдання робилося за допомогою комп'ютерних програм SolidWorks і LVMFlow. Спеціа-

лізоване програмне забезпечення підвищує ефективність роботи інженера-технолога і дає можливість імітувати технологічні процеси віртуально [157-160].

На рис.5.7 а, б представлена тривимірна модель деталі «корпус насоса». 3D модель несе в собі якнайповніший опис фізичних властивостей об'єкту (об'єм, маса, моменти інерції), яка після збереження у форматі «stl» була імпортована в програму LVMFlow (рис. 5.7,в).

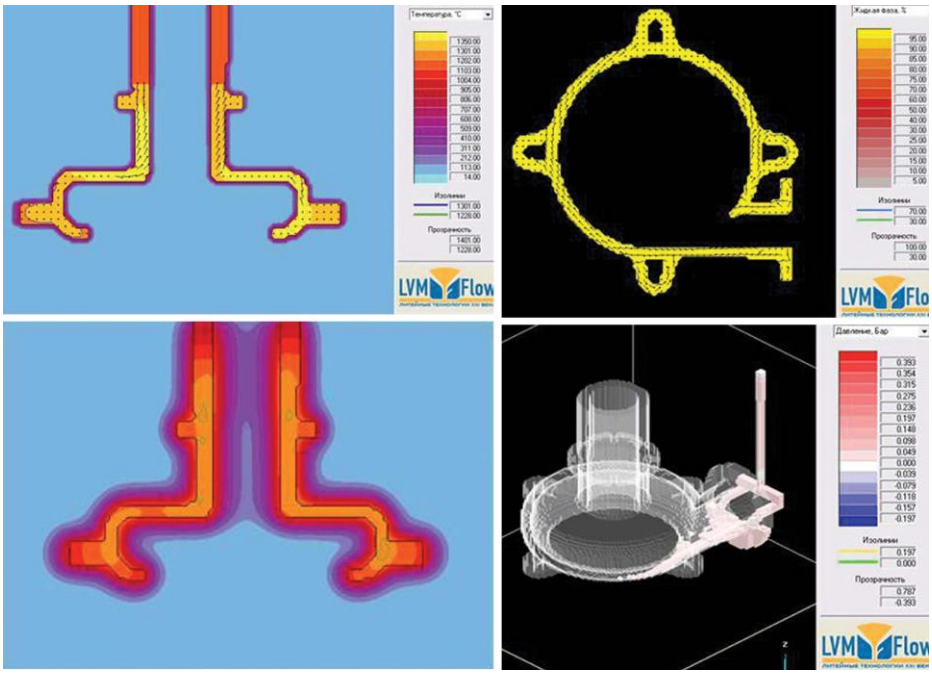


а б в

Рис.5.7. 3D - модель корпусу насосу (а,б), створена в програмі Solid Works та імпортована (в) в програму LVMFlow

За допомогою програми LVMFlow була проаналізована ливарна технологія з метою отримання якісних виливків: були проконтрольовані хід заливання (рис. 5.8, а, б), температурний режим у формі (рис. 5.8, в), швидкості заливання, тиск на стінки форми (рис. 5.8, г), усадка (рис. 5.9, а), а також розраховані переріз, розмір і об'єм надливу, необхідного для живлення виливка. Був доданий надлив відповідно до значень, рекомендованих програмою LVMFlow. Виконати циліндричний прибуток Ø110 мм в місці, що вимагає живлення не представлялося можливим у зв'язку з особливостями конструкції деталі, тому застосували кільцевий надлив, що приблизно відповідає рекомендованому перерізу і розмірам.

а



б

в

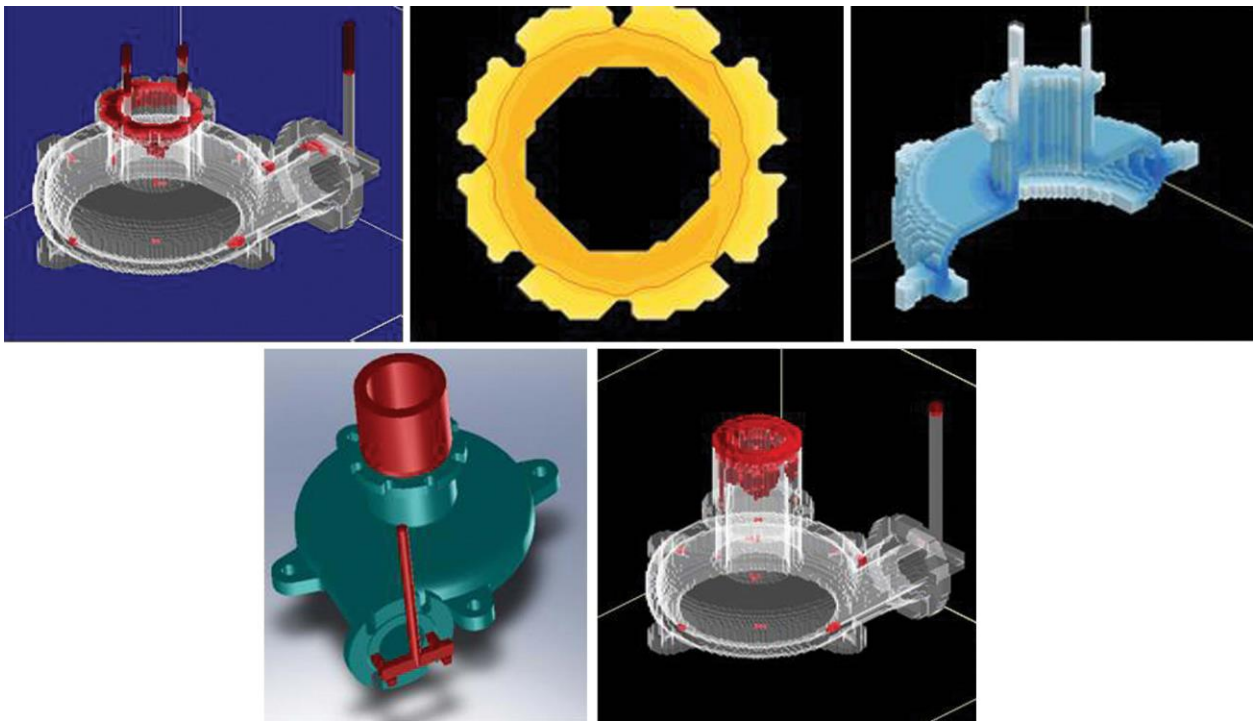
г

Рис. 5.8. Контроль параметрів в ході заливки: а- контроль ходу заливки деталі у формі; б - контроль напряму руху розплаву у формі; в - контроль температурного режиму у формі; г - контроль тиску, який робить рідкий метал на стінки форми

Послідовність процесу моделювання наведена на рис. 5.9. Проконтролювавши усі параметри визначувані програмою LVMFlow, отримані дані про те, що модельована технологія задовольняє усім вимогам отримання якісного виливка «Корпус насоса».

Остаточне моделювання заливання і аналіз розрахункових полів, дозволяє зробити висновок, що розміри спроектованих живильників, шлаковловлювача, стояка розраховані правильно. При заливці не створюється підвищений тиск на стінки форми з боку живильників, що виключає розмив форми. Також порожнина форми повністю заповнюється, при цьому живильники не перемерзають, це свідчить про те, що переріз живильників і їх кількість вибрані правильно.

а б в



г д

Рис. 5.9. Процес моделювання:

а - контроль утворення дефектів усадкового походження; б - визначення теплового модуля за допомогою визначення параметра модуль; в - визначення теплового модуля за допомогою визначення параметра час твердіння; г - модель «Корпус насоса» з доданими елементами ливниково- живлючої системи в програмі SolidWorks, розробленими після моделювання за допомогою параметра «теплового модуля» і заливки «без усадки»; д - отриманий результат моделювання технології виготовлення деталі «Корпус насоса»

Також результати моделювання заливки деталі корпус насоса, показало, що надлив, розрахований методом визначення теплового модуля, повністю працює і дозволяє уникнути у виливку дефектів усадкового походження (рис. 5.9 д). Важливо відмітити, що надлив на фланці корпусу є єдино можливим місцем його установки.

У реальному виробництві його установка недоцільна з наступних причин:

1. Видалення надливу необхідно вести механічним обробленням, що є істотною витратною частиною в технологічному процесі виготовлення виливка «Корпус насосу» з причини того, що оброблюваність високо хромистих сплавів дуже скрутна;

2. Фланець - місце утворення усадкових дефектів в процесі кристалізації. Об'єм усадкових дефектів незначний і не здатний вплинути на експлуатаційні характеристики насоса, оскільки фланець не бере участь в процесі перекачування пульпи, не схильний до зносу і конструктивно носить тільки монтажне призначення.

Розроблений технологічний процес був випробуваний у виробництві. Отримані якісні виливки (акт від 05.10.2014р.). Експлуатаційні показники дослідного чавуну 2м (ИЧ290Х16Н(РЗМ) вказані в табл. 5.8.

Таблиця 5.8

Результати випробовування насосу 5ГрК-8 в експлуатації

Матеріал насосу	Період експлуатації, год	Знос, %
ИЧХ290Х28Н2	1200	100
ИЧ290Х16Н(РЗМ)	1200	80

Напрацювання насосу НКУ-5, яке було отримано в результаті багаторічного досвіду експлуатації на ГЗКах по здобичі залізної, уранової і марганцевої руди в Дніпропетровській області складає в середньому 1200 год. В результаті застосування насосу НКУ-5, виготовленого із запропонованого дослідного сплаву за удосконаленою технологією, отримано напрацювання 1650 год.

Таким чином, випробування в експлуатації дослідної партії виливків з високохромистого комплексномодифікованого чавуну показали, що стійкість їх була вищою на 20% у порівнянні зі сплавом ИЧХ28Н2.

5.7. Висновки за розділом 5

1. Проведені лабораторні дослідження виплавки модифікованих високо хромистих чавунів за варіантами застосування трьох комплексних модифікаторів за результатами визначення структурних змін та фізико-механічних і службових властивостей показало доцільність застосування для модифікування виливків комплексного модифікатора на основі РЗМ.

2. У порівнянні зі сплавом ИЧХ28Н2 середнє значення межі міцності при розтягу модифікованих сплавів трьох дослідних серій було на 33% більшим, а середнє значення межі міцності при вигині – більшим на 86% . Твердість модифікованих сплавів також була вищою за сплав ИЧХ28Н2 на 24…46%.

3. Чавун, оброблений комплекснім модифікатором на основі рідкісноземельних металів, мав міцність при розтягу на 48, а міцність при вигині на 98% більшим у порівнянні зі сплавом серійного виробництва ИЧХ28Н2.

4. Моделювання заливки деталі «корпус насоса», показало, що надлив, розрахований методом визначення теплового модуля, досить повно працює і дозволяє уникнути у виливку дефектів усадкового походження, а розміри спроектованих живильників, шлаковловлювача, стояка були розраховані правильно.

5. З серії дослідних промислових плавок, виконаних методом переплавлення, по розплавленню повернення виробництва і продукції, що відпрацювала корисний термін експлуатації та отримана з гірничо-збагачувальних комбінатів, встановлено, що хімічний склад чавуну, усереднено, відповідає наступній марці ИЧХ290Х16Н(РЗМ), яка є близькою до багатьох існуючих промислових марок високохромистих зносостійких чавунів, і перекликається в змісті багатьох елементів, проте повністю не співпадає ні з одним з них.

6. На підставі представлених досліджень була розроблена технологічна інструкція ТИ МРРЗ СТП_73.19-2012 «Виплавка високохромистого зносостійкого чавуну модифікованого комплексним модифікатором методом пе-

реплавки відходів виробництва ИЧХ28Н2 в дуговій печі ємністю 3,5 тонни з основним футеруванням». Згідно технологічної інструкції дослідженому чавуну присвоєна виробнича марка ИЧХ290Х16Н(РЗМ) для використання у виробництві ПАО «Марганецький рудоремонтний завод».

7. Виробничі випробування розробленого технологічного процесу виробництва корпусів насоса показали підвищення службових властивостей матеріалу. Напрацювання насосу НКУ-5 збільшилося на 37%.

Матеріали розділу опубліковані в [122, 153-155, 159-160].

ВИСНОВКИ

Вирішення поставленої мети було досягнуто шляхом аналітичних, теоретичних і експериментальних досліджень із застосуванням фундаментальних положень та сучасних уявлень теорії ливарного виробництва. Головним підсумком роботи є теоретичне узагальнення і нові вирішення наукової задачі з розробки науково обґрунтованого комплексу методів отримання виливків з комплексно модифікованих зносостійких білих чавунів різного ступеня легованості з метою підвищення їх фізико-механічних та експлуатаційних властивостей.

Висновки та рекомендації дисертаційної роботи:

1. Аналіз сучасного стану виробництва виливків зі зносостійких чавунів і відповідної науково-технічної літератури виявив, що яскравими представниками високо навантажених деталей гірничо-збагачувальної і металургійної промисловості, що виготовляються з чавунів різного ступеня легованості є: подрібнювальна куля, двошаровий листопрокатний валок та корпус насосу багеру. Обрані деталі об'єднує те, що вони є швидко зношуваними деталями відповідального технологічного устаткування.

2. Проведені лабораторні та промислові дослідження виплавки комплексно модифікованих зносостійких білих чавунів різного ступеня легованості за результатами визначення структури, фізико-механічних і службових властивостей показало доцільність застосування для модифікування виливків комплексного модифікатора на основі рідкісноземельних металів.

3. Проаналізовані промислові технології виготовлення чавунних подрібнювальних куль литтям в піщану форму і кокіль. Технологічні процеси одержання чавунних подрібнювальних куль мають недоліки, які рекомендовано усунути проведенням лабораторних досліджень за різними

варіантами вдосконалення чинного процесу лиття для одержання якісного литва.

4. Проведені лабораторні дослідження дозволили встановити зміни, які відбуваються у виливках з модифікованих рідкісноземельними металами зносостійких чавунів та їх вплив на службові властивості. Отримані результати власних дослідницьких плавок з застосуванням для модифікування виливків комплексних модифікаторів на основі рідкоземельних металів дозволили вдосконалення хімічні склади та властивості виливків та запатентувати нові склади чавунів для виливків (патенти України на винаходи № 97439 «Чавун», № 98996 «Чавун для прокатних валків» та № 99218 «Чавун зносостійкий»).

5. Визначення найбільш ефективної конструкції кокілю і дослідження процесу кристалізації в ньому дозволило обрати з дев'яти технологічних рішень оптимальну конструкцію кокілю з наявністю радіатору, що істотно зменшувало масу кокілю та його ефективну тепловідвідну здатність. У виробничих умовах ливарного цеху використання кокілю нової конструкції показало, що він є найефективнішим.

6. На підставі експериментальних досліджень і комп'ютерного моделювання був розроблений вдосконалений технологічний процес кокільного лиття куль, що включає позапічне модифікування розплаву чавуну рідкоземельними металами, вибивання виливків з форм при температурі в інтервалі 650….800ºС і охолодження після вибивання на повітрі. Комплексний показник якості виливків, виготовлених за такою технологією, підвищувався на 58….60% в порівнянні з виливками серійного виробництва. Виробничі випробування удосконаленого технологічного процесу виробництва литих куль у багаторазові металеві форми на установці карусельного типу показали поліпшення службових властивостей куль.

7. На підставі експериментальних досліджень і комп'ютерного моделювання був розроблений удосконалений технологічний процес виготовлення двошарових прокатних валків, що включає модифікування розплаву робочого шару чавуну рідкісноземельними металами і термічну обробку литих заготовок. Аналіз структури в різних перерізах бочок валків серійного і експериментального показав, що комплексна обробка призводила до зменшення мікротвердості цементиту, мартенситу і бейніту та 3-4%, тонко диференційованого перліту – на 7% , що було пов’язано з процесами відпуску бейнітно-мартенситної структури матриці, а матеріал робочого шару дослідного валка у порівнянні з серійним мав підвищені механічні властивості: границя міцності при розтягу - на 3-7%, границя міцності при вигині - на 2-3%, а ударна в’язкість- на 4-15%. Твердість робочого шару практично не змінювалася, а термостійкість була на 27% більшою.

8. Проведені лабораторні дослідження дозволили встановити зміни, які відбуваються в дрібних виливках з високолегованого модифікованого рідкісноземельними металами чавуну та їх вплив на службові властивості. У порівнянні зі сплавом ИЧХ28Н2 фізико-механічні властивості зразків з модифікованих сплавів трьох дослідних серій були на 24-86% більшими.

9. З серії дослідних промислових плавок, виконаних методом переплавлення, по розплавленню повернення виробництва і продукції, що відпрацювала корисний термін експлуатації та отримана з гірничо-збагачувальних комбінатів, встановлено, що хімічний склад чавуну, усереднено, відповідає наступній марці – ИЧХ290Х16Н(РЗМ). Виробничі випробування розробленого технологічного процесу виробництва корпусів насоса показали підвищення експлуатаційних властивостей матеріалу. Напрацювання насосу НКУ-5 збільшилося на 37%.

10. На підставі виробничих досліджень була розроблена технологічна інструкція на виплавку високохромистого модифікованого комплексним

модифікатором зносостійкого чавуну методом переплавки відходів виробництва ИЧХ28Н2 для використання у виробництві ПАТ «Марганецький рудоремонтний завод».

11. В екологічному плані лиття виливків за трьома удосконаленими технологіями позитивно вплине на охорону навколишнього середовища.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1.Кривошеев, А.Е. Литые валки. Теоретические и технологические основы производства / А.Е. Кривошеев. – М.: Гостехиздат, 1957. – 360 с.

2. Гиршович, Н.Г. Справочник по чугунному литью/ Н.Г.Гиршович.– 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1978.– 758 с.

3. Марукович, Е.И. Износостойкие сплавы / Е.И. Марукович, М.И.Карпенко. – М.: Машиностроение, 2005. – 428 с.

4. Гарбер, М.Е. Износостойкие белые чугуны: издание 2-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2010. – 280 с.

5. Чугун: Справ. изд./ Под ред. А.Д. Шермана и А.А.Жукова.–М.: Металлургия, 1991. – 576 с.

6. Высококачественные чугуны для отливок/ В.С. Шумихин, В.П. Кутузов, А.И. Храмченков и др.; Под ред. Н.Н. Александрова. – М.: Машиностроение, 1982. – 222.

7. Костецкий, Б.И. Трение, смазка и износ в машинах / Б.И.Костецкий.– Киев: Техніка, 1970. – 396 с.

8. Костецкий, Б.И. Фундаментальные закономерности трения и износа / Б.И. Костецкий. – Киев: Знание, 1987. – 30 с.

9. Крагельский, И.В. Основы расчета на трение и износ / И.В.Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – С.5–35

10. Крагельский, И.В. Трение и износ/ И.В. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1968. – 480с.

11. Krause, H. Investigation into the influence of dynamic forces on the tribologicalbenavior of bodies in rollingStidingcontact with particular regard tosurface corrugations/ H. Krause, T. Senuma.// Trans. ASME. J. Lubrik. Technol.– 1981. – V. 103, № 1. – P. 26–34.

12. Сосновский, Л.А. Статистическая механика усталостного разрушения/ Л.А. Сосновский. – Мн.: Наука и техника, 1987. – 287с.

13. Rabinowiez, E. Friction and Wear of materials/ E. Rabinowiez. – New York: I.Willey and Sons, 1965. – 244 p.

14. Большой энциклопедический словарь / Гл. ред. А.М.Прохоров.-3-е изд. – М.: Сов. энциклопедия, 1991.– 1631 с.

15. Ferrous metals // Machine Design.– 1984.– Vol. 56, № 8. – P.7–12, 14–18, 20–26, 31–33.

16. Іванова, Л.Х., Маймур Я.С., Калашникова А.Ю., Захарова Т.В. Застосування системного підходу для підвищення службових властивостей чавунних виливків // Системні технології. – 2011. – №5 (76). – С.173-177.

17. Цыпин, И.И. Белые износостойкие чугуны – эволюция и перспективы // Литейное производство. – 2000. – № 9. – с.15-16.

18. Донченко, А.С. Справочник механика рудообогатительной фабрики / А.С. Донченко, В.А. Донченко.– 2-е изд. перераб. и доп. – М.: «Недра», 1975. – 543 с.

19. Донченко А.С. Справочник механика рудообогатительной фабрики/ А.С. Донченко, В.А. Донченко. – М.: «Недра», 1986. – 543 с.

20. Калашникова А.Ю., Иванова Л.Х., Кравцов С.В., Вакуленко В.Г. Модифицированные износостойкие чугуны для отливок // Теория и практика металлургии. – 2013. – № 3-4(92-93). – С.25-28.

21. Цыпин И.И. Белые износостойкие чугуны. Структура и свойства/ И.И. Цыпин. – М.: Металлургия, 1983. – 176 с.

22. Бор, кальций, ниобий и цирконий в чугуне и стали / Пер. с англ. В.А.Мчедлишвили и В.В.Ховрина; Под ред. С.М.Винарова. – М.: Металлургиздат, 1961. – 459 с.

23. Бобро, Ю.Г. Легированные чугуны / Ю.Г. Бобро. – М.: Металлургия, 1976.– 28 с.

24. Сильман Г.И. Отливки из износостойких белых чугунов / Г.И. Сильман, И.С. Фрольцов. – М., 1982.– 44 с.

25. Маркин И.С. Изготовление абразивостойких деталей из белых износостойких чугунов / И.С. Маркин, Ф.З. Вунштейн. – М., 1971. – 43 с.

26. Лядский, В.Б. Марганцовистый чугун – материал для деталей машин, работающих на износ. Обзор / В.Б. Лядский.– Душанбе, 1971.– 31 с.

27. Карпенко, М.И. Износостойкие отливки / М.И. Карпенко, Е.И. Марукович.– Минск: Наука и техника, 1984.– 215 с.

28. Гарбер, М.Е. Отливки из белых модифицироанных чугунов / М.Е. Гарбер. – М.: Машиностроение, 1972. – 112 с.

29. Свойства и применение белых мартенситных чугунов Нихард/ ГПНТБ СССР.-№73/71312.–77с. – Брошюра фирмы «International Nickel Co/ (Mond) ltd», Великобритания.–36 р.

30. Иванова Л.Х., Колотило Е.В., Калашникова А.Ю., Белич А.В., Муха Д.В. Особенности обработки чугунов редкоземельными металлами// Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. научн. трудов. Вып. 58. Днепропетровск: ГВУЗ «ПГАСА», 2011.– С.295-298.

31. Иванова Л.Х., Хитько А.Ю., Маймур Я.С., Калашникова А.Ю., Шляпин И.В., Муха Д.В., Кисляков С.А. Модифицированные половинчатые и серые чугуны // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. научн. трудов. Вып. 64. – Днепропетровск: ГВУЗ «ПГАСА», 2012. – С.319-323.

32. Калинин, В.Т. Научные основы прогрессивных технологий модифицирования и легирования чугунов для отливок металлургического оборудования: дисс. … докт. техн. наук 05.16.04: защищена 05.10.05: утв. 19.01.06 / Калинин Василий Тимофеевич. – Днепропетровск, 2005. – 324 с.

33. Будагьянц, Н.А. Литые прокатные валки / Н.А. Будагьянц, В.Е. Карский. – М.: Металлургия, 1983. – 175 с.

34. Заявка №51–17132 Японии. Составной чугунный валок с отбеленной поверхностью бочки // Изобретения за рубежом. – 1978. – №18.–- С. 158.

35. Пат. №2088656-1 Франция, Валок для горячей прокатки // Изобретения за рубежом. – 1978. – №18. – С. 158.

36. Будагьянц, Н.А. Центробежные двухслойные валки для непрерывных широкополосных станов / Н.А. Будагьянц, Л.Б. Гольдштейн, И.А. Балаклеец // Сталь. – 1992. – №4– С. 50–52.

37. Лесовой, В.В. Состояние и перспективы технического перевооружения металлургических предприятий / В.В. Лесовой // Теория и практика металлургии. – 1999. – №4. – С. 4–7.

38. Могилев, В.К. Повышение стойкости изложниц и прокатных валков / В.К. Могилев, О.И. Лев. – М.: Металлургия, 1986. – 118 с.

39. Николаев, В.А. Научные принципы создания технологии восстановления и повышения эксплуатационной стойкости прокатных валков / В.А. Николаев, В.Н.Давыдов, С.П. Ефименко.– М.:Черметинформация, 1989.–91 с.

40. Гончаров, В.Н. Повышение износостойкости двухслойных чугунных валков листопрокатных станов / В.Н. Гончаров, В.В. Коробейник, В.Я. Тишков // Сталь. – 1991. – №10. – С. 65–68.

41. Рудницкий, Л.С. Металлургические основы производства чугунных валков прогрессивных видов: дисс. … докт. техн. наук 05.16.04 / Рудницкий Лев Самуилович. – Днепропетровск, 1981. – 495 с.

42. Иванова, Л.Х. Теоретические основы и практические методы получения литых прокатных валков из комплексномодифицированных чугунов: дис. … докт. техн. наук 05.16.04: защищена 05.02.08: утв. 02.07.08 / Иванова Людмила Харитоновна. - Днепропетровск, 2007. – 412 с.

43. Иошио, Нури Влияние окислов на зародышеобразование в переохлажденном железе / Нури Иошио, Лхаши Тецуро, Асано Кончи // V Совет-

ско–Японский симпозиум по физико–химическим основам металлургических процессов.– М, 1975. – С. 66–106.

44. Ловцов, Д.П. Применение лигатурных сплавов и соединений лития, бериллия, циркония и редкоземельных элементов в металлах и сплавах / Д.П. Ловцов. – М.: ЦНИИЦМ, 1961. – С. 60–64.

45. Клочнев, Н.И. Технология производства отливок из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом / Н.И. Клочнев. – М.: Машгиз, 1962. – С. 169–171.

46. Касьянов, Н.А. Технико–экономический анализ применения редкоземельных сплавов в производстве чугунов / Н.А. Касьянов, Х.Ф. Клубничкин. – М.: Госкомцветмет, 1964. – 48 с.

47. Иванов, Д.П. Вопросы первичной кристаллизации графита в чугуне, модифицированном редкоземельными металлами / Д.П. Иванов, И.А. Вашуков, В.И. Крестьянов // Литейное производство. – 1963. – № 12. – С. 26–30.

48. Siefer, W. Jahresubersicht SonderguB (2.Folge) (HartguB und WalzenguB) / W. Siefer // Giesserei. □ 1965.□ Bd.52, №12 .□ S. 389□396.

49. Вихров, А.В. Разработка и внедрение новых технологических процессов легирования и модифицирования чугуна для прокатных валков: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.16.04 / Вихров Александр Васильевич; Белорус. политехнич. ин–т. Минск, 1989. – 18 с.

50. Горбульский, Г.Ф. Свойства синтетических чугунов, модифицированных силикомишметаллом / Г.Ф. Горбульский, Г.Е. Каплан, В.М. Попов // Редкоземельные металлы, сплавы и соединения. □ М.: Наука, 1973. □ С. 206□209.

51. Уткин, Н.И. Производство цветных металлов / Н.И. Уткин. – М.: ”Интермет Инжиниринг”, 2000.– 442 с.

52. http://www.cmmarket.ru/markets/raworld.htm, Мировой рынок редкоземельных металлов/ www.cmmarket.ru-15.08.2013

53. Приданцев, М.В. Влияние примесей и редкоземельных элементов на свойства сплавов / М.В. Приданцев. – М.: Металлургиздат, 1962.– 208 с.

54. Пат. 302574 GB, МКИ С22с. Process of Emploing Cerium in the Production of Iron and Steel: Пат. 302574 GB, МКИ С22с-A.L. Lund (GB).– 1928.– 2р.

55. Morrough, H., Williams W.J. The production of nodular graphite structures in cast iron / H. Morrough, H., W.J. Williams // Journal of Iron and Steel Institute. – 1948. – Vol.158, № 3. – P. 306–322.

56. Morrough, H. Nodular Graphite Structures / H. Morrough // Journal of Research and Development.– 1950– Vol.248.– P. 52–59.

57. Пат. 2488511 США, МКИ С21С 1/00. Grey Cast Irons with Nodular Graphite: Пат. 2488511 США, НКИ 75–130. H. Morrough (США); The Int. Nickel Co, Inc.– Заявл.15.11.49;Опубл.26.12.50. НКИ 75–130.– 3 с.

58. Morrough, H. Production of Nodular Graphite Structures in Grey Cast Irons / H. Morrough // Transactions American Founrymens Society.– 1948.– V.56.– P. 72.

59. Калашникова А.Ю., Витер Д.А., Иванова Л.Х. Влияние низкотемпературного отпуска на структуру и свойства материала двухслойных валков // Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейном производстве: материалы V междунар. науч.-техн. конф., 21-25 сент. 2015. – Краматорск: ДГМА, 2015.– С. 89-90.

60. Хрущев, М.М. Исследование влияния твердости абразива на износ металлов / М.М. Хрущев, М.А. Бабичев. // Повышение износостойкости и срока службы машин. – Киев-Москва: Машгиз, 1956. –

61. Хрущев, М.М. Исследование изнашивания металлов / М.М. Хрущев, М.А. Бабичев. – М.: Изд-во АН СССР, 1960.

62. Барон, Л.И. Абразивность горных пород при добывании / Л.И. Барон, А.В. Кузнецова. – М.: Изд. АН СССР, 1961.

63. Антонов, А.А. Исследование изнашивания воздушно-абразивной струей: автореф. дисс. … канд. техн. наук /Антонов А.А.; МИНХ и ГП им. Губкина. – М., 1963. – 18 с.

64. Топоров, Г.В., Исследование износостойкости в мокрой абразивной среде/ Г.В. Топоров, Г.И. Киселев. – Отчет Томского инженерно-строительного института, 1963.

65. Пикнин, В.Ф. Повышение износостойкости высокохромистого чугуна / В.Ф. Пикнин // Литейное производство. – 1994.– № 3. – С. 6–9.

66. Виноградов, Ю.М. Теория и износ модифицированных материалов / Ю.М. Виноградов. – М.: Наука, 1972. – 150 с.

67. Вишкарев, А.Ф. Теоритические основы комплексного раскисления на свойства сталей / А.Ф. Вишкарев, С.А. Близнюков, В.М. Явойский // Влияние комплексного раскисления на свойства сталей. – М.: Металлургия, 1982. – С. 5–11.

68. Бабаскин, Ю.З. Структура и свойства литой стали / Ю.З.Бабаскин. – К.: Наукова думка, 1980.– 240 с.

69. Сильман, Г.И. Методика термодинамического анализа стройных систем в области трехфазного равновесия. Диаграммы состояния металлических систем / Г.И. Сильман. – М.: Наука, 1971. – С. 231–240.

70. Engineering Properties and Application of Ni-Hard Martensitic White Cast Iron / International Nickel Limited. – London, 1965.

71. Гиршович Н.Г. Чугунное литье / Н.Г. Гиршович. - М.-Л. Металлургиздат, 1949. – 708 с.

72. Солнцев, Л.А. Получение чугунов повышенной прочности / Л.А. Солнцев. – Х.: Вища школа, 1986. – 152 с.

73. Чейлях, А.П. Экономнолегированные и метастабильные сплавы и упрочняющие технологии / А.П. Чейлях. – Х.: ННЦХФТИ, 2003. – 212 с.

74. Пенкин, В.Ф. Модифицирование чугуна тонкодисперсными порошками / В.Ф. Пенкин // Литейное производство. – 1994. – №3. – С. 5–7.

75. Венглер, В.В. Использование модификаторов пылевидной фракции / В.В. Венглер, С.П. Дмитриев, А.Н. Ерышканов, О.М. Абдулин // Литейное производство. – 1989. – №8. – С. 6.

76. Могилев, В.К. Опыт применения суспензионного модифицирования в литейном производстве / В.К. Могилев. – Днепропетровск: УкрНТО ЧМ, 1981. – 32 с.

77. Bedolla-Jacuinde, A. // Material Science and Engineering / A. Bedolla-Jacuinde. – 2005. – Vol. 398. – P. 297–308.

78. Arkan, M.M.НАЗВАНИЕ // Wear.– 2001. – Vol. 247. – P.231–235.

79. Николаев, Н.А. Исследование влияния химического состава и некоторых технологических факторов на качество листопрокатных валков: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.323 / Николаев Николай Андреевич; Днепропетр. металлург. ин–т.– Днепропетровск, 1968.– 21 с.

80. Руденко, Н.Г. Изучение ремодифицирующего влияния церия, лантана и титана на процессы формообразования графита при кристаллизации чугуна: автореф. дис. …канд. техн. наук: 05.323/ ИПЛ АН УССР.– К., 1969.– 24 с.

81. Hildenfeldt, W. Tabellenbuch GuBwerkstoffe: Fertigungsverfahren, Eigenschaften, Anwendung / W. Hildenfeldt, K. Herfurth.– Leipzig: Dtsch. Verl. Grudstoffind., 1983.– 300 s.

82. Гиршович, Н.Г. Кристаллизация и свойства чугуна в отливках / Н.Г.Гиршович.– М.-Л.: Машиностроение, 1966. – 562 с..

83. Ващенко, К.И., Кошовник Г.И., Атанасова И.Р. Влияние ниобия на свойства серого чугуна / К.И. Ващенко, Г.И. Кошовник, И.Р. Атанасова. // Термодинамика, физическая кинетика структурообразования и свойства чугуна и стали. – М.: Металлургия, 1971.– Вып.4.– С. 448–452.

84. Ниобий и его сплавы / Г.В.Захарова, И.А.Попов, Л.П.Жорова, Б.В.Федин.– Л.: Металлургиздат, 1961.– 368 с.

85. Скобло, Т.С. Влияние добавок Nb на свойства чугуна / Т.С.Скобло, Н.И.Сандлер, В.К.Парфенюк, Б.С.Гильман // Литейное производство.– 1968.– №7.– С. 21-22.

86. Боков, Л.Ф. Исследование и применение комплекснолегированных чугунов для отливки сортопрокатных валков: автореф. дис…канд. техн. наук: 05.323/ Боков Леонид Филиппович; Днепропетр. металлург. ин–т. – Днепропетровск, 1973.– 21 с.

87. Бунин, К.П. Строение чугуна / К.П. Бунин, Ю.Н. Таран. – М.: Металлургия, 1972. – 160 с.

88. Святкин, Б.К. Эффективные методы повышения качества легированных чугунов в отливках / Б.К. Святкин, М.И. Карпенко, А.С. Налетов. – М.: ЦНИИТЭИЛЕГПИЩЕМАШ, 1977. – 44 с.

89. Бобро, Ю.Г. Износостойкость стали Х12М при газоабразивном изнашивании в потоке сахарного тростника/ Ю.Г. Бобро // Изв. Вузов. Черная металлургия. – 1988. – №9. – С.114–116.

90. Николаев, Е.Н. Термическая обработка металлов и оборудование для термических цехов/ Е.Н.Николаев. – М.: Высшая школа, 1980.–192 с.

91. Peck, C.F. A proposed method of calculating residual stresses in iron rolls / C.F. Peck // Iron and Steel Engineer.– 1956.– Vol.33, №12.–- P. 121–124.

92. DiGiola, A.M., Peck C.F. Residual Stresses in Double-Pour Cast Iron Work Rolls / A.M. DiGiola, C.F. Peck // Iron and Steel Engineer.– 1956.–Vol.33, №3.– P. 58–61.

93. Funke, P. Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Spannungen in einer Walze fur verschiedene Belastungsfalle / P. Funke // Archiv fur das Eisenhuttenwesen.– 1974.– Bd.45, №1.– S. 45–50.

94. Жукевич-Стоша, А.В. К вопросам о прочности прокатных валков/ А.В.Жукевич-Стоша // Теория и практика металлургии.–1936.–№ 5.–С.63–70.

95. Адамов, И.В. Исследование процессов отливки двухслойных прокатных валков высокой твердости из хромоникелевого чугуна: автореф.

дис. … канд. техн. наук: 05.323/ Адамов Иван Васильевич; Днепропетр. металлургич. ин–т. – Днепропетровск, 1967. – 22 с.

96. Bauer, O. Ueber GuBspannungen und die Mittel zu ihrer Beseitigung / O. Bauer, K. Sipp // Die Giesserei.– 1936.– Jg.9, № 11.– S. 253–256.

97. Богачев, И.Н. Металлографические основы получения качественного чугуна чугуна / И.Н. Богачев. – М.: Свердловск: Металлургиздат, 1940.– 136 с.

98. Allison, F.H. Modern manufacture and use of cost rolling mill rolls/ F.H. Allison, C.E. Peterson // Iron and Steel Engineer. – 1954.– Vol.31, №12.– P. 68–76.

99. Василенко, А.А. Термическая обработка чугуна с глобулярным графитом/ А.А. Василенко, К.К. Прожога // Высокопрочные чугуны. – К.: Машгиз, 1954.– С. 93–100.

100. Коробейник В.В. Определение оптимальной температуры отжига чугунных сортопрокатных валков для снятия остаточных напряжений / В.В.Коробейник, С.И.Рудюк, С.В.Спирина и др. // Литейное производство.– 1978.– №1.–- С. 26–27.

101. Повышение стойкости чугунных валков станов «350» и «250» Макеевского металлургического завода им. С.М.Кирова: Отчет о НИР (заключит.)/ Днепропетр. металлургич. ин-т. – Д., 1968.– 62 с.

102. Коробейник, В.В. Снижение остаточных напряжений при отжиге чугунных валков / В.В.Коробейник, С.И.Рудюк, В.И.Вакула и др. // Литейное производство.– 1979.– №9.– С. 4–6.

103. Ветрова, Т.С. Влияние температуры отжига на микроструктуру и свойства валкового чугуна/ Т.С. Ветрова, Б.Г. Ветров, Л.И. Агапова // Литейное производство.–1978.– № 12.– С. 29.

104. Разработка технологии производства крупногабаритных каландровых валов повышенной твердости для бумажной и химической промыш-

ленности и исследование показателей их качества: Отчет о НИР (заключит.)/Днепропетр. метал-лургич. ин–т. – Днепропетровск, 1969.– 73 с.

105. Norman, T. Martensitic white irons for abrasion- resistant Castings / T. Norman, A. Solomon, P. Doane // Modern Castings. – 1959. – Vol. 35, №4.– P.104–118.

106. Рожкова, Е.В. Влияние углерода на превращение аустенита белых хромистых чугунов/ Е.В. Рожкова, М.Е. Гарбер, И.И. Цыпин // МиТом. – 1981.– №1.– С.

107. Morafray, F. / Trans AFS. – 1971. – Vol. 79.– P.121–124.

108. Салтыков, С.А. Стереометрическая металлография / С.А.Салтыков. – М.: Металлургия, 1970.– 376 с.

109. Кривошеев, А.Е. О влиянии анормальной структуры на свойства отливок из отбеленного магниевого чугуна / А.Е.Кривошеев, Ю.Н.Таран, Л.Т.Калинина, Н.А.Николаев // Известия вузов. Черная металлургия. – 1965.– № 7. – С. 169–174.

110. Гоулдстейн, Дж., Ньюбери Д., Эчлин П., Джой Д., Фиори Ч., Лифшин Ф. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ: в двух книгах / Дж. Гоулдстейн, Д. Ньюбери, П. Эчлин, Д. Джой, Ч. Фиори, Ф. Лифшин; Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 303 с.

111. Карпенко, В.Ф. Разработка и освоение технологии литья мелющих тел из белых чугунов для рудоразмольных мельниц: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.16.04/ Карпенко Виктор Федорович; Завод–втуз при Моск. автомоб. з–де им. И.А. Лихачева.– М., 1988. – 18 с.

112. Stauffer, W.A. Verschlei durch sandhaltings wasser in hydraulischen nglagen / W.A. Stauffer // Schweizer Archiv, Angewandte Wissenschaft und Technic.– 1958. – Bd. 24, №78. –S.215–265.

113. Гамольская, З.М. Износостойкость сталей в условиях гидроабразивного износа / З.М. Гамольская, В.М. Гутерман // Труды ВНИИПТУглемаш. – Вып.11. – М.: Недра, 1966.– С.

114. Бельченко, Г.И. Исследование структуры и свойств половинчатого чугуна для сортопрокатных валков / Г.И. Бельченко // Сб. тр. ДМетИ, Вып. 31.– К.: Гостехиздат, 1954. – С.212–231.

115. Boissenot, J.M. Etude quantitative de la rupture de cylindres de laminoirs a table lisse / J.M.Boissenot, M.Dubois, J.C.Lachat et.al.// Revue de Metallurgie. – 1977. – Vol.74, №6. – S. 333–345.

116. Сэкимото, Я. Влияние режима прокатки на температуру поверхности рабочих валков (чистовой клети) полосового стана горячей прокатки / Я. Сэкимото //Тэцу то хаганэ. – 1975. – Т.16, №10. – С. 2337–2349.

117. http://www.solidworks.com/sw/products/3d-cad/packages.htm , ©2016 Dsault Systemes SolidWorks Corporation.

118. http://wp_lvm.mkmsoft.ru/?page_id=2 , Программное обеспечение LVMFlowCV. Разработка НПО МКМ.

119. http://www.statgraphics.com/product , STATGRAPHICS Homepage 2016

120. Дюк, В. Обработка данных на ПК в примерах / В. Дюк. – СПб.: «Питер», 1997.– 240 с.

121. Белай, Г.Е. Организация металлургического єксперимента: Учебное пособие для вузов / Г.Е. Белай, В.В. Дембовский, О.В. Соценко/ Под редакцией В.В. Дембовского. – М.: Металлургия, 1993.– 256 с.

122. **Калашникова А.Ю**., Белич А.В., Иванова Л.Х. Разработка технологического процесса литья с помощью программ компьютерного инженерного анализа // Международный научный журнал Технического университета Acta Universitatis Pontica Euxinus. Стратегия качества в промышленности и образовании: Спец. выпуск: Материалы VIII междунар. конф., 2012 г.: тезисы докл.– Варна, Болгария, 2012.– т. 2. – С. 74-77.

123. Harrington, E.C. The Desirability Function / E.C. Harrington // Industrial Quality Control.– 1965.– Vol.21, №10.– P. 494–498.

124. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский.– М.: Наука, 1976. – 279 с.

125. Иванова Л.Х., **Калашникова А.Ю.** Влияние отпуска на структуру и свойства двухслойных прокатных валков // Проблемы высокотемпературной техники. Сб. научн. трудов.– Днепропетровск: Пороги, 2013. – С.97-100.

126. **Калашникова А.Ю.,** Иванова Л.Х., Алексеенко А.С. Мелющие тела из комплексномодифицированного чугуна // Литье. Металлургия. 2015: материалы XI междунар. науч.-практ. конф., 27-29 мая 2015 г. – Запорожье: Ред.оттдел ЗТТП, 2015.– С.122–123.

127. **Калашникова А.Ю.,** Іванова Л.Х. Розробка складу високоміцного чавуну з високою ударостійкістю // Литье – 2011: материалы VII междунар. науч.-практ. конф., 21-23 апр. 2011 г.: тезисы докл.- Запорожье: Ред.отдел ЗТТП. – 2011.-С.98-100.

128. Іванова Л.Х., Колотило Є.В., Хричиков В.Є., Хазанов А.В., Шляпін І.В., **Калашникова А.Ю.** Патент на винахід України № 97439 «Чавун», № 201010221; заявл.19.08.10. Опубл. 10.02.12, Бюл. №10.

129. Іванова Л.Х. Маймур Я.С., **Калашникова А.Ю**., Бура Ю.М. Легувальний комплекс для підвищення ударостійкості чавунних виливків // Теория и практика металлургии.– 2012.– №5-6. – С.116-117.

130. Иванова Л.Х., **Калашникова А.Ю**., Алексеенко А.С. Литье из модифицированного чугуна // Нові конструкційні сталі та стопи і методи їх оброблення для підвищення надійності та довговічності виробів: зб. матеріалів XIII міжнарод. наук.-техн. конф. 6-8 жовт. 2014 р.– Запоріжжя: ЗНТУ, 2014. – С.110-112.

131. Іванова Л.Х., Хричиков В.Є., Колотило Є.В., **Калашникова А.Ю**., Самойленко А.Г. Патент на винахід України № 99218 «Чавун зносостійкий», № 201106603; заявл.26.05.11; опубл. 25.07.12, Бюл. №14.

132. Белай Г.Е. Исследование влияния модифицирования на кристаллизацию чугуна, структуру и свойства листопрокатных валков: Автореф. дис.… кандидата техн. наук: 05.323/ Днепропетр. металлург. ин–т.– Д., 1967.- 23 с.

133. Савицкий Е.М. Перспективы исследования и применения редкоземельных ме-таллов, сплавов и соединений // Редкоземельные металлы и сплавы. - М.: Наука, 1971.- С.5-17.

134. Влияние церия и лантана на отбел чугуна / А.Е.Кривошеев, Г.Е.Белай, Л.С.Рудницкий, Л.Ф.Боков // Литейное производство.- 1967.- №3.- С. 14-17.

135. Приданцев М.В. Влияние примесей и редкоземельных элементов на свойства сплавов. -М.: Металлургиздат, 1962.- 208 с.: ил.– Библиогр.:с. 204–207.

136. Руденко Н.Г. Изучение ремодифицирующего влияния церия, лантана и титана на процессы формообразования графита при кристаллизации чугуна: Автореф. дис. …кандидата техн. наук: 05.323/ ИПЛ АН УССР.- К., 1969.- 24 с.

137. Иошио Нури, Тецуро Лхаши, Кончи Асано. Влияние окислов на зародышеобразование в переохлажденном железе // V Советско–Японский симпозиум по физико–химическим основам металлургических процессов.- М.,1975.- С.66-106.

138. Аникин А.А. Экспериментально-теоретические основы получения иттриевого чугуна для производства деталей ответственного назначения в отраслях народного хозяйства: Автореф. дис. … доктора техн. наук: 05.16.04/ Моск. ин-т стали и спл.-М., 1989.- 47 с.

139. Богачев, И.Н. Металлография чугуна / И.Н. Богачев. – Свердловск: Металлургиздат, 1962. –

140. National Metals Handbook ASST Ferrous Section. Справочник ASST по термообработке Чугун и сталь / Пер. под ред. А.А.Рыбарж.– М.: ОНТИ НКТП СССР, 1936.– 766 с.

141. Исследование структуры и свойства термообработанного чугуна с целью выбора оптимальных тепловых режимов обработки литых литых листопрокатных валков: отчет НИР (заключ.): №90004 / ДМетИ; рук. Белай Г.Е.; исполнит.: Иванова Л.Х. [и др.]. – Днепропетровск, 1977. – 50 с.

142. Тайц, Н.Ю. Технология нагрева стали / Н. Ю. Тайц. – М.: Металлургиздат, 1962. – 567с.

143. Иванова, Л.Х. Влияние отпуска на структуру и свойства двухслойных прокатных валков/ Л.Х. Иванова, А.Ю. Калашникова // Проблемы високотемпературной техники: сб. науч. тр.ДНУ им. О.Гончара.– Днепропетровск: Пороги, 2013. – С.97–100.

144. Іванова, Л.Х. Термічна обробка чавунних прокатних валків/ Л.Х. Іванова Л.Х., Є.В. Колотило, А.Ю. Калашнікова, Т.В. Захарова // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: Зб. наук. праць. – 2011.– № 4(25). – С.87–90.

145. Іванова, Л.Х. Исследование структуры и свойств валковых комплексно-модифицированных чугунок/ Л.Х. Іванова, Е.В. Колотило, А.Ю. Калашникова // Вісник Дніпропетровського університету. – №4. Серія «Ракетно-космічна техніка».– 2012. – С.67-73.

146. Калашникова А.Ю., Иванова Л.Х., Симоненко В.В. Повышение качества двухслойных прокатных валков // Нові матеріали і технології в машинобудуванні: матеріали VI наук.-техн. конф. 20-21 трав. 2014 р.– К.: НТУУ КПІ, 2014.– С.47-49.

147. Kalashnikova A., Ivanova L. Improving of quality bilayer cast iron mill rolls // 11 міжнародн. симпозіум Хорватського метал. тов-ва: «Materijali metalurgija» SHMD‘2014 «METALURGIJA. Materials and metallurgy», 22-26 июня 2014 г.: – Summaries of lectures. – Sibenik. – 2014. - p. 52.

148. Іванова Л.Х., Колотило Є.В., Хричиков В.Є., Хазанов А.В., Калашникова А.Ю., Шляпін І.В., Івонін І.В. Патент на винахід України № 98996 «Чавун для прокатних валків», № 201010187; заявл.18.08.10. Опубл. 10.07.12, Бюл. №13.

149. Хрычиков В.Е. Адаптация модели LVMFlow к процессу затвердевания чугунного прокатного валка/ В.Е. Хрычиков, А.П. Белый, Е.В. Меняйло, Д.В. Маркелова// Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: Зб. наук. праць. – 2011.– № 4(25). – С.160–163.

150. Соценко О.В. Компьютерное моделирование процесса затвердевания крупногабаритных каландровых валов / О.В. Соценко, А.С. Снетков, А.В. Белич, И.Л. Соковнин // Процессы литья. – 2011. – № 3. – С. 45–52.

151. Соценко О.В. Компьютерное моделирование технологического процесса литья деталей энергоемких промышленных изделий/ О.В. Соценко, И.Ю. Посыпайко, А.В. Белич// Компрессорное и энергетическое машиностроение. –- 2011. – № 2. – С. 21–23.

152. Іванова, Л.Х. Моделирование заливки двухслойного прокатного валка / Л.Х. Іванова, А.Ю. Калашникова, О.А. Ніколаєнко // Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ІТММ’2017: тези доп. Дев’ятої міжнародної наук.-практич. конф., (Дніпро, 28-30 берез. 2017 р.) – Д.: НМетАУ, 2017.– С.36.

153. Калашникова А.Ю., Иванова Л.Х. Модифицированные хромистые чугуны // Литье. Металлургия. 2016: Материалы XII междунар. науч.-практ. конф., 24-26 мая 2016 г.: тезисы докл.– Запорожье: Ред.оттдел ЗТТП, 2016.– С.104–105.

154. Иванова Л.Х., Калашникова А.Ю., Нестерук С.В. Улучшение качества отливок из хромистого чугуна// Теория и практика металлургии. – 2017.– № 3-4(110-111). – С.125-124.

155. Калашникова А.Ю., Иванова Л.Х., Хитько А.Ю. Комплекснолегированный чугун для износостойких отливок // Литье – 2012: материалы

VIII междунар. науч.-практ. конф., 22-25 мая 2012 г.: тезисы докл.- Запорожье: Ред.отдел ЗТТП. – 2012.– С.120-121.

156. Laird II G., Powell G.L.F. // Met. Trans. A. –1993. –Vol.24. –P.981.

157. Девятов, С. ProCast – виртуальное моделирование литейных технологий. Для тех, кто привык быть впереди / С. Девятов // CADmaster. – 2006. – № 5. – С. 36–43.

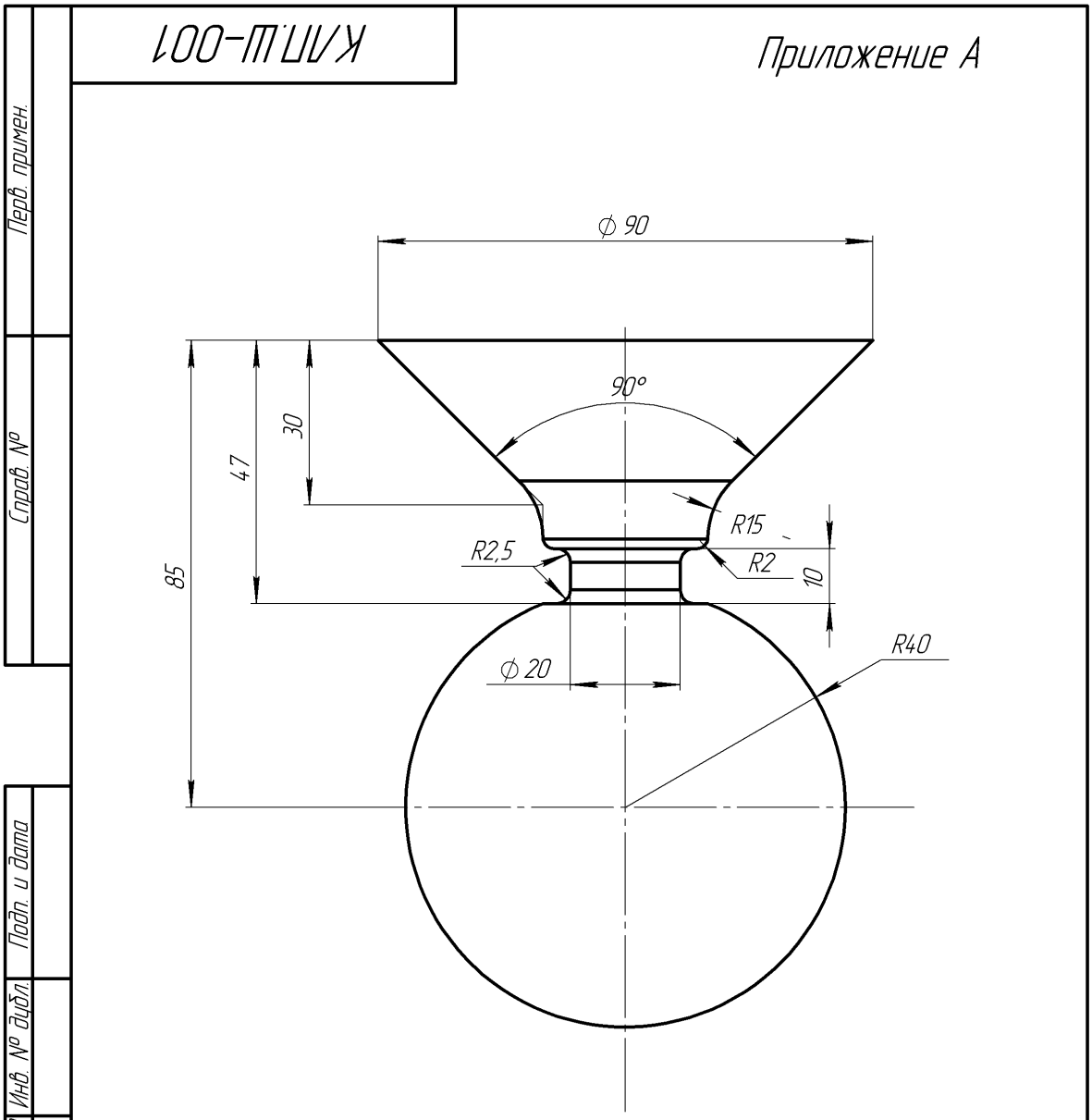
158. Девятов, С. Прогрессивные методы в литейной технологии – моделирование и анализ / С. Девятов // CADmaster. – 2003. – № 2. – С. 19–23.

159. Соценко О.В., Белич А.В., Иванова Л.Х., Калашникова А.Ю. Разработка технологического процесса литья отливки «Корпус насоса» из износостойкого чугуна // Литейное производство. – 2013.– № 4. – С.30-32.

160. Калашникова А.Ю., Белич А.В., Иванова Л.Х. Разработка технологического процесса литья отливки «Корпус насоса» из высокохромистого чугуна // Неметалеві вкраплення і гази у ливарних сплавах: збірник тез XIII міжнарод. наук.-практич. конф. 9-12 жовт. 2012 р. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2012.– С.80-81.

ДОДАТКИ

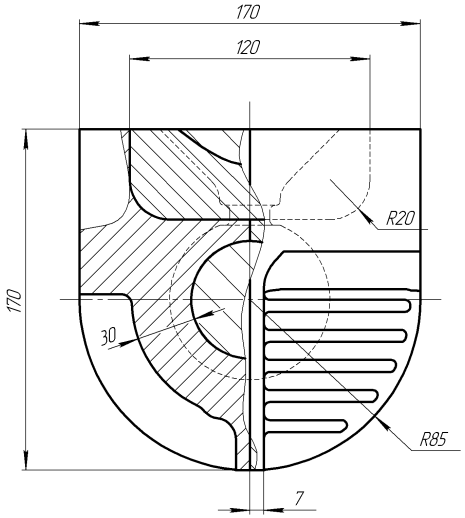
Додаток А

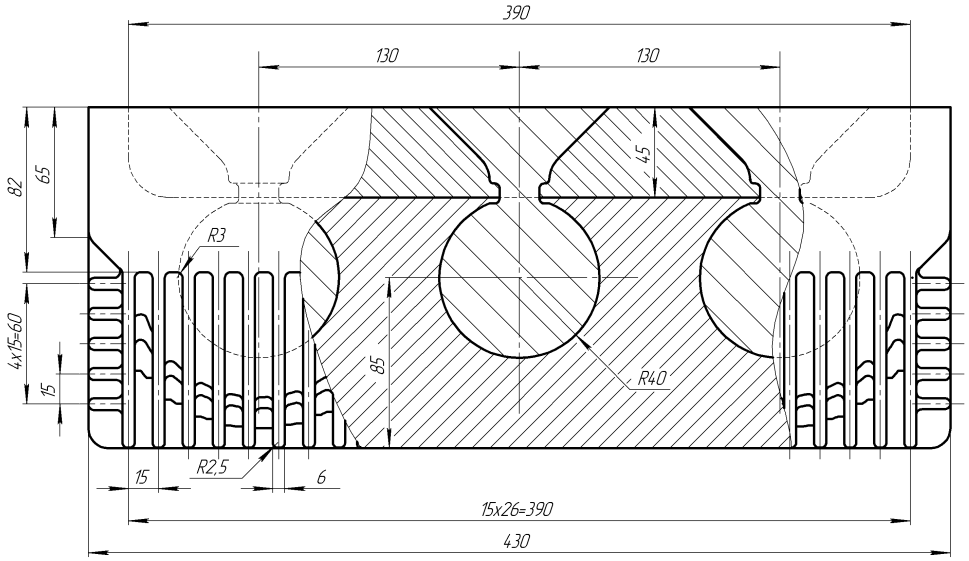

Приложение А
ϕ 90
90°
30
47
85
R15
R2,5
R2
10
R40
ϕ 20
КЛП.Ш-001
ШАР ϕ 80мм
Элементы
литейной формы
Лит.
Масса
Масштаб
2.65
1:2
Лист:
Листов: 1
НМетАУ
Изм. Лист № докум. Подп. Дата
Разраб. Калашникова А.Ю. 30.5.14.
Пров.
Т. контр.
Н. контр.
Утв.
Перв. примен.
Справ. №
Подп. и дата
Инв. № дубл.
Взам. инв. №
Подп. и дата
Инв. № подл.
Шифр:
Копировал
Формат А4

Додаток Б

КЛП.КШ-001.01СБ

Приложение Б





Форм	Зона	Поз	Обозначение	Обозначение	Кол.	Примечание
		1	КЛП.Ш-001	Шар	3	
		2		Кокиль	2	
		3		Экзотермическая вставка	1	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		Колошникова А.Ю.		15.11.2013
Пров.				
Т. контр.				
Н. контр.				
Утв.				

КЛП.КШ-001.01СБ

Кокиль
шар ⌀ 80мм

Лит.	Масса	Масштаб
		1:2
Лист	Листов 1	

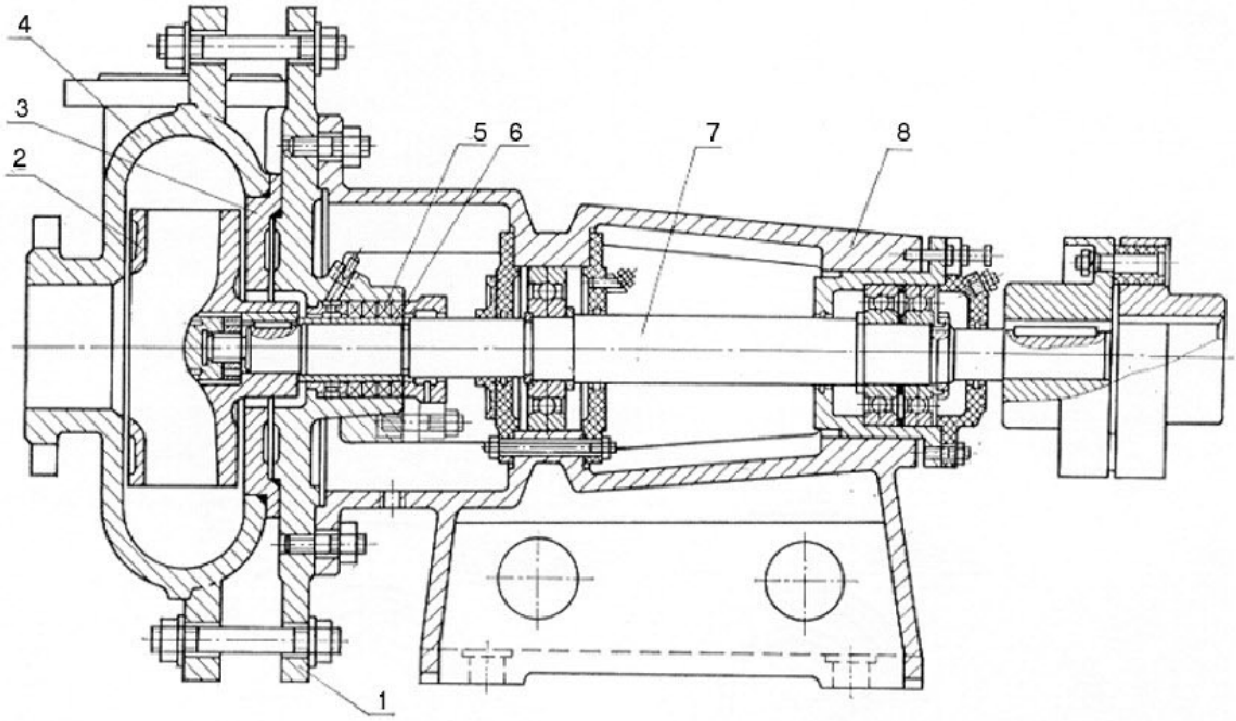
НМетАУ

Шифр: Копировал Формат А3

Перв. примен. | Справ. № | Подп. и дата | Инв. № дубл. | Взам. инв. № | Подп. и дата | Инв. № подл.

Додаток В

Загальний вид насосу 5ГрК-8



1- кришка корпусу,

2- робоче колесо,

3- захистний диск,

4- корпус насосу,

5- вузел сальника,

6- захисна втулка,

7- вал,

8- опорна стійка

ЗАТВЕРДЖУЮ
Перший проректор
Національної металургійної академії України,
доктор технічних наук, професор

_____ В.П. Іващенко
«17» березня 2014 р.

А К Т

про впровадження результатів дисертації "Удосконалення технологічних процесів одержання виливків з модифікованих зносостійких чавунів для металургійної та гірничорудної промисловості" Калашнікової А. Ю.
в навчальному процесі

Ми, що нижче підписалися, начальник навчального відділу НметАУ Пульпінський В.Б., завідувач кафедри ливарного виробництва, доктор технічних наук, професор Хричиков В.Є., вчений секретар кафедри ливарного виробництва Осипенко І.О. склали цей акт у тому, що розроблені технологічні рішення одержання зносостійких чавунних виливків з використанням комлексних модифікаторів, наведені у дисертації "Удосконалення технологічних процесів одержання виливків з модифікованих зносостійких чавунів для металургійної та гірничорудної промисловості", впроваджено у навчальний процес на кафедрі з дисциплін «Спеціальні та особливі види литва» та «Прогресивні технології лиття виливків із чорних та кольорових металів і сплавів».

Начальник
навчального відділу НМетАУ В. Б. Пульпінський

Завідувач кафедри
ливарного виробництва,
д.т.н., проф. В.Є. Хричиков

Вчений секретар кафедри
ливарного виробництва
ст. викл. І.О. Осипенко

ЗАТВЕРДЖУЮ
Перший проректор
Національної металургійної академії України,
доктор технічних наук, професор

_____ В.П. Іващенко
«19» листопада 2014 р.

А К Т

про впровадження результатів кандидатської дисертації Калашнікової Аліни Юріївни
«УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ОДЕРЖАННЯ ВИЛИВКІВ З МОДИФІКОВАНИХ ЗНОСОСТІЙКИХ ЧАВУНІВ ДЛЯ МЕТАЛУРГІЙНОЇ ТА ГІРНИЧОРУДНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ»
в навчальному процесі

Ми, що нижче підписалися, начальник навчального відділу НМетАУ Пульпінський В.Б., завідувач кафедри ливарного виробництва, доктор технічних наук, професор Хричиков В.Є., вчений секретар кафедри ливарного виробництва асистент Осипенко І.О. склали цей акт у тому, що розроблені наукові і технологічні основи комплексного удосконалення технологічних процесів виробництва зносотійких чавунних виливків відмінного хімічного складу та призначення, з метою отримання максимальних експлуатаційних та механічних властивостей готової продукції, що наведені у дисертаційній роботі Калашнікової А.Ю., впроваджено у навчальний процес на кафедрі з дисциплін «Спеціальні та особливі види литва» та «Прогресивні технології лиття виливків із чорних та кольорових металів і сплавів».

Начальник
навчального відділу НМетАУ В. Б. Пульпінський

Завідувач кафедри
ливарного виробництва,
д.т.н., проф. В.Є. Хричиков

Вчений секретар кафедри
ливарного виробництва
ст. викл. І.О. Осипенко

Утверждаю:

главный Инженер ПАО «МРРЗ»

Кошевой М.П.

«___»_____2014г.

АКТ

производственных испытаний усовершенствованной технологии литья отливки «шар», выполненной из чугуна, модифицированного комплексным модификатором

Мы, нижеподписавшиеся, начальник литейного цеха ПАО «МРРЗ» Бабинцов Р.Л., начальник ЦЗЛ ПАО «МРРЗ» Кравченко В.М., зам. председателя правления по качеству ПАО «МРРЗ» Белич А.В. и аспирант Национальной металлургической академии Украины Калашникова А.Ю. составили настоящий акт о том, что на ПАО «Марганецкий рудоремонтный завод» в 2013 году проведены испытания усовершенствованного технологического процесса производства литых шаров в кокильную форму из износостойкого чугуна, модифицированного комплексным модификатором, содержащим РЗМ.

В результате испытаний определено, что отливка шар, выполненная по усовершенствованному технологическому процессу имеет характеристики значительно выше отливок полученных традиционным методом, а именно: ударостойкость шара повысилась на 45%, объемная твердость - на 7%. Также за счет изменения конструкции кокиля увеличилась теплоотводящая способность кокиля что, как следствие, благоприятно сказалось на структуре чугуна. Повышение теплоотводящей способности кокиля позволило повысить производительность производственного оборудования. Применение кокиля усовершенствованной конструкции позволило снизить затраты на кокильную оснастку в виду меньшей металлоемкости кокиля.

Представители ПАО «МРРЗ»:

Начальник ЛЦ

_____Бабинцов Р.Л

Начальник ЦЗЛ

_____ Кравченко В.М.

Зам. председателя правления по качеству

_____Белич А.В.

Представители НМетАУ:

Аспирант

_____Калашникова А.Ю.

Утверждаю:

главный инженер ПАО «МРРЗ»

_____ Кошевой М.П.

«__» _____ 2014г.

АКТ

производственных испытаний высокохромистого чугуна ИЧ290Х16Н(РЗМ), модифицированного комплексным модификатором

Мы, нижеподписавшиеся, начальник литейного цеха ПАО «МРРЗ» Бабинцов Р.Л., начальник ЦЗЛ ПАО «МРРЗ» Кравченко В.М., зам. председателя правления по качеству ПАО «МРРЗ» Белич А.В. и аспирант Национальной металлургической академии Украины Калашникова А.Ю. составили настоящий акт о том, что на ПАО «Марганецкий рудоремонтный завод» в 2012 году проведены испытания высокохромистого чугуна полученного методом переплава отходов и возврата производства ИЧХ28Н2 с меньшим содержанием легирующих элементов и применением комплексного модификатора с содержанием РЗМ. Чугуну присвоено обозначение ИЧ290Х16Н(РЗМ).

Результаты испытаний показали, что полученный чугун имеет характеристики, не уступающие чугуну ИЧХ28Н2, в том числе, и по износостойкости в гидроабразивной среде. По результатам испытаний произведена опытная партия улит насосов модификации 5ГрК-8 в количестве 5шт. Партия передана «Марганецкому ГОКу» для проведения промышленных испытаний состоянием на 2014г в процессе эксплуатации и ППР определено, что насосы наработали 90% запланированного срока эксплуатации, при этом износ рабочей поверхности на всех улитах не превышает 70%.

Представители ПАО «МРРЗ»:

Начальник ЛЦ

_____ Бабинцов Р.Л

Начальник ЦЗЛ

_____ Кравченко В.М.

Зам. председателя правления по качеству

_____ Белич А.В.

Представители НМетАУ:

Аспирант

_____ Калашникова А.Ю.

ПАО "МРРЗ"

Выплавка высокохромистого износостойкого чугуна модифицированного комплексным модификатором методом преплава отходов производства ИЧХ28Н2 в дуговой печи емкостью 3,5 тонны с основной футеровкой

ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО "МАРГАНЕЦКИЙ РУДОРЕМОНТНЫЙ ЗАВОД"

УТВЕРЖДАЮ
Главный инженер
_____ Кашевой М.П.
30.08.2012

"МАРГАНЕЦЬКИЙ РУДОРЕМОНТНИЙ ЗАВОД" 05448389 УКРАЇНА

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНСТРУКЦИЯ

ТИ МРРЗ СТП_73.19-2012

Начальник литейного цеха
_____ Бабинцов Р.Л.
30.08.2012

Аспирант кафедры литейного производства "НМетАУ"
_____ Калашникова А.Ю.
29.08.2012

Зам. председателя правления по качеству
_____ Белич А.В.
30.08.2012

Дубл. Взам. Подл.

ТЛ

ПАО "МРРЗ"

Модифицирование и раскисление стали 110Г13Л комплексным смесевым раскислителем на основе барий-стронций- кальциевых карбонатов

ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО "МАРГАНЕЦКИЙ РУДОРЕМОНТНЫЙ ЗАВОД"

УТВЕРЖДАЮ
Главный инженер
_____ Кошевой М.П.
30.08.2012

Руководство № _____

Настоящая инструкция определяет технологический процесс производства высокохромистого износостойкого чугуна методом переплава отходов и возврата производства ИЧХ28Н2 для фасонного литья в дуговой электропечи с основной футеровкой и модифицирования комплексным модификатором содержащим РЗМ

Разраб.	Калашникова А.Ю.		
Н.Контр			

ТИ

Дубл. Взам. Подл.

1. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ

При выплавке высокохромистого чугуна ИЧ290Х16Н(РЗМ) для фасонного литья руководствоваться химическим составом, приведенным ниже:

Марка чугунга	C,%	Si,%	Mn,%	Cr,%	Ni,%	P,%
ИЧ290Х16Н(РЗМ)	2,6-3,2	до 1,0	до 1,0	15-17	0,8-1,5	Не более 0,05

Химический состав комплексного модификатора СРЗМ30

модификатор	Si,%	Al,%	РЗМ,%	Fe,%
СРЗМ30	40-48	8-10	30-34	≤15

Для максимально полного и качественного эффекта модифицирования чугуна, целесообразно снижениесодержания P иSb расплаве.

2. ПРИМЕНЯЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

2.1 МЕТАЛЛИЧЕСКАЯ ШИХТА

2.1.1 Лом чугуна ИЧХ28Н2
2.1.2 Чугун передельный ДСТУ3133-95
2.1.3 Чугун литейный ДСТУ3132-95
2.1.4 Технологические отходы литейного производства высокохромистого и нелегированного чугуна.

Технологические отходы литейного производства должны быть очищены от пригара, формовочных материалов, которые затрудняют плавление шихты и формирование основного шлака и иметь стандартный габарит 600х350х250 мм, в соответствии с ДСТУ4121-2002.

2.2 ТРЕБОВАНИЯ К ШИХТОВЫМ МАТЕРИАЛАМ

2.2.1 На шихтовых материалах не допускается налет ржавчины, примесей, ГСМ и т.д.

2.2.2 Шихтовые материалы должны быть просушены, не допускается наличие воды, влаги.

2.2.3 Не допускается смешивание шихтовых материалов

2.3 ФЕРРОСПЛАВЫ, МОДИФИКАТОРЫ.

2.3.1 Ферросилиций марок ФС 45, ФС 65 ДСТУ 4127:2002.

2.3.2 Ферромарганец марок ФМн 88, ФМн 78 ДСТУ 3547-97.

2.3.3 Феррохром ГОСТ4757-91 (ИСО 5448-81).

2.3.4 Никель ГОСТ849-2008.

2.3.6 Модификатор комплексный СРЗМ30.

2.4 ШЛАКООБРАЗУЮЩИЕ

2.4.1 Известняк обожженный ТУ 48-5-64-83.

2.4.2 Плавиковый шпат ГОСТ 29220-91

2.5 ЗАПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

2.5.1 Порошок периклазовый марки ППЭ – 88 ГОСТ 24862-81

2.5.2 Жидкое стекло с удельным весом 1,47 - 1,52. (Допускается использование вместо жидкого стекла лигносульфанатщелочи ТУ 13-028-1036-05-89).

2.5.3 Глина формовочная огнеупорная ГОСТ 3226-93.

3. ПОДГОТОВКА ПЕЧИ К ПЛАВКЕ

Заправку печи следует производить сразу после выпуска металла в максимально короткое время, во избежание охлаждения футеровки печи.

После выпуска плавки подина и откосы тщательно очищаются от остатков металла и шлака. Наличие остатков металла на подине недопустимо, особенно при переходе на выплавку чугуна или стали другой марки или плохом состоянии подины. Остатки металла могут явиться причиной нарушения заданного химического состава металла, местного срыва подины. Они препятствуют свариванию заправочных материалов с футеровкой, что приводит к сгущению шлака и дальнейшему разрушению подины.

В первую очередь заправляются углубления и ямы на подине сухим магнезитовым порошком (без жидкостекольного раствора), затем заправляются откосы магнезитовым порошком на водном растворе жидкого стекла.

Если подина глубокая, доведение ее до нормального профиля производиться постепенно путем подсыпки сухим магнезитовым порошком слоем 60-70мм в течение 2-3 плавок. Для закрепления подины перед завалкой металлошихты на подину задать известняк массой 100-150кг.

При заправке печи обеспечить пологий откос у выпускного отверстия для хорошего схода металла и шлака во время выпуска плавки.

При приемке смены сталевар и сменный мастер обязаны проверить состояние желоба и установить объем необходимого его ремонта.

За 50 мин до выпуска плавки желоб печи должен быть подготовлен.

Рабочая площадка возле желоба должна быть зафутерована шамотным кирпичом. На каркасе желоба и рабочей площадке вокруг него не должно быть скрапа.

После выпуска плавки со стен выпускного отверстия желоба и сливного носка удалить остатки металла и шлака, очистить от мусора. Осуществить ремонт желоба: поврежденные места зафутироватькирпичом или подмазать массой, состоящей из 25% огнеупорной глины и 75% шамотного мертеля на водном растворе жидкого стекла. После подмазки или ремонта желоб тщательно высушить газовой горелкой.

Состояние желоба должно обеспечить слив металла компактной струей без разбрызгивания, для чего стенки и дно желоба должны быть ровными, на носке желоба не должно быть настылей металла, отбитой кромки и расширения (развала) футеровки. Стенки желоба должны плавно сближаться к носу.

«Песочный затвор» должен обеспечить плотную посадку свода. Состояние свода, заслонки рабочего окна и выпускного отверстия должно обеспечить хорошую герметизацию печи.

4. ВЫПЛАВКА ВЫСОКОХРОМИСОГО ЧУГУНА ИЧ290Х16Н(РЗМ) МЕТОДОМ ПЕРЕПЛАВА

4.1 РАСПРАВЛЕНИЕ ШИХТЫ

4.1.1 С появлением жидкого металла присадить шлаковую смесь, состоящую из извести и плавикового шпата в соотношении 3:1.

4.1.2 После полного расплавления в печь дополнительно задать шлаковую смесь, перемешать шлак шомполом до его оплавления, отобрать пробу, после чего шлак скачать начисто.

4.1.3 После скачивания навести новый рафинировочный шлак и тщательно перемешать его.

4.1.4 При необходимости произвести легирование ферросплавами до получения заданного химического.

4.1.5 При получении по расплавлению содержания химических элементов выше заданного выполнить разбавление расплава ломом не легированного чугуна

5. ВЫПУСК ПЛАВКИ

При получении команды от мастера и сталевара на выпуск плавки подручный должен приступить к разделке выпускного отверстия с помощью металлического штыря и совковой лопаты. Совковой лопатой выбрать магнезитовую набивку из выпускного отверстия до спекшейся корки, корку пробить ломом с мостика.

Ковш подавать подогретый до температуры 650 градусов по Цельсию. Установить его под желоб с таким расчетом, чтобы во время выпуска плавки струя металла не могла сбить стопор или размыть стенку ковша. Носок должен находиться над шлаковней. Ковш подать осторожно, чтобы траверсой крана не сбить стопор.

При выпуске металла необходимо регулировать положение ковша по мере его заполнения и, в зависимости от наклона печи, давая команды крановщику. Воспрещается переполнять ковш металлом.

Наполненный ковш быстро подать к первой форме, установить ручку стопорного механизма и, в зависимости от разности температуры, замеренной в печи и необходимой для заливки, дать соответствующую выдержку в ковше.

Выдержку металла в ковше в процессе его заливки между двумя формами производить запрещается. Данные о падении температуры при выпуске в ковш и разливке металла приведены ниже.

Емкость ковша, т	Падение температуры при выпуске в ковш, °С	Падение температуры в ковше, в градусах/мин		
		Первые 10 мин	10-20 мин	Более 20 мин
2-3	75-85	4,0-5,0	2,5-3,0	2-2,5
4-5	70-80	3,0-4,0	2,0-2,5	1,5-2,0

Примечания:

1. В случае обнаружения сырой заправочной массы при разделке выпускного отверстия принять дополнительные меры безопасности: совковой лопатой удалить заправочную массу с отверстия и желоба. Разделку корки произвести с мостика длинным штырем во избежание попадания брызг металла на подручного.
2. Присутствие контролера ОТК при выпуске металла в ковш - строго обязательно.
3. Отключить печь от электроэнергии и произвести выпуск плавки в ковш. Выпуск производить короткой и компактной струей.

6. МОДИФИЦИРОВАНИЕ РАСПЛАВА

Присадку модификатора производить на до ковша из расчета ≈1% от массы жидкого металла. Контроль массы ковша до разливки и ковша с жидким металлом обязателен. Выдержка металла после модифицирования не менее 10 минут.

Модификатор дробить до фракции 2…7мм, содержание пылевидной составляющей не более 10%.

7. НЕПОЛАДКИ ВО ВРЕМЯ ПЛАВКИ В ЭЛЕКИРОПЕЧАХ И ИХ УСТРАНЕНИЕ

При обвале огнеупора из сводовых колец в начале периода расплавления или при наличии в печи расплавленного, но не готового к выпуску металла, необходимо:

1. Немедленно выключить печь
2. Прекратить доступ воды к кольцам
3. Подложить под трубки водяного охлаждения железные стержни для предупреждения обвала охлаждающих колец
4. Удалить электроды, снять сводовое кольцо, закрыть все отверстия в своде асбестовыми листами и удалить с поверхности расплавленного металла упавшие кирпичи

При обвале одного сводового кольца плавку довести до конца, сняв это кольцо и работая на данном электроде без охлаждения. Если обвал колец произошел при наличии в печи готового к выпуску металла необходимо:

1. Выключить печь и поднять электроды
2. Вылить металл в шлаковню под приямком. При этом необходимо вставить еще не застывший металл несколько загнутых металлических колец, что в дальнейшем облегчит транспортировку козла.

При прорыве металла через стенки необходимо:

1. Выключить печь и быстро подать к месту прорыва смесь магнезита с окалиной.
2. В том случае, когда прорыв металла задержать невозможно вылить часть металла в шлаковню через выпускное отверстие или рабочее окно (в зависимости от места прорыва металла).
3. Если прорыв металла произошел со стороны выпускного отверстия и ниже его, необходимо наростить порог, наклонить печь в сторону рабочего окна так, чтобы уровень металла снизился по отношению к месту прорыва и так довести плавку до конца.

При поломке электродов во время плавки принять все меры для извлечения из печи обломившихся частей.

Для предупреждения неполадок по электрической части необходимо:

1. Не допускать нагрева соединений в электропроводке. В случае их нагрева, направить работу печи по специальному режиму, установленному для данного конкретного случая.
2. При падении напряжения вследствие перебоев по центральной станции переходить со звезды на треугольник, повышая этим напряжением на шинах печной подстанции.

3. При внезапном выключении тока немедленно выключить главный масляный выключатель и принять электроды.

4. При выключении тока на длительное время уплотнить все зазоры между электродами для сохранения тепла в печи. При отключении тока более чем на 30 минут слить металл в ковш, чтобы в печи не образовался «козел». Если нет возможности слить металл, то следует бросить под электроды несколько чушек чугуна и накрыть шлак кусками кокса размерами 50-60мм. это позволит впоследствии улучшить прогрев поверхности «козла».

Примечание:

1. При расплавлении «козла» необходимо внимательно следить за тем, чтобы электроды не дошли до подины.

2. В случае неполадки трансформатора, немедленно выключить печь, включить ее лишь по специальному разрешению.

8. ТЕХНИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

8.1 Мастер участка, старший мастер цеха:

8.1.1 Назначение плавки контроль шихтовки плавки.

8.1.2 Состояние футеровки стен, свода и подины печи, желоба.

8.1.3 Температура металла в печи перед выпуском в ковш.

8.1.4 Состояние ковша, поданного под плавку (нагрев, очистка от шлака, отсутствие скрапа в ковше).

8.1.5 Качество подготовки желоба и выпускного отверстия, контроль раскисления металла алюминием в ковше.

8.1.6 Результат химического анализа стали по ходу плавки, а также ковшевых проб по результатам анализа химической лаборатории.

8.1.7 Состояние ковша после разливки (наличие скрапа).

8.1.8 Записи сталевара по периодам в плавочном журнал - наряде.

8.2 Сталевар:

8.2.1 Состояние футеровки печи, свода, желоба, водоохлаждаемых узлов электропечи, а также трансформатора печи.

8.2.2 Подготовку и взвешивание шихты. Взвешивание легирующих, раскислителей, модификаторов, их физическое

состояние (влажность, перемешивание с другими ферросплавами, загрязнение другими материалами).

8.2.3 Подготовку заправочной смеси для заправки подины, откосов, выпускного отверстия. Качество выполнения заправочных работ.

8.2.4 Скачивание и наводка шлака в различные периоды плавки. Состояние шлакового режима во время плавления, окисления, рафинировки, пред выпуском.

8.2.5 Тепловые и электрические режимы во все периоды плавки, температуру металла.

8.2.6 Правильность взятия пробы металла на химический анализ.

8.2.7 Скорость окисления углерода.

8.2.8 Отправка проб в химическую лабораторию.

8.3 Отдел технического контроля:

8.3.1 Количество и качество применяемых материалов шихтовых и шлакообразующих, ферросплавов, раскислителей, модификаторов по физическому состоянию и соответствию требованиям сертификатов, ТУ.

8.3.2 Контроль прокалки ферросплавов и шлакообразующих.

8.3.4 Продолжительность периодов плавки.

8.3.5 Правильность отбора проб металла и шлака.

8.3.6 Температурный режим по ходу плавки по показаниям термопары погружения.

8.3.7 Температура металла в печи перед выпуском.

8.3.8 Состояние ковша, поданного под заливку: нагрев, очистка от шлака и скрапа.

8.3.9 Правильность замера температуры металла в ковше, количество шлака.

8.3.10 Продолжительность выдержки металла в ковше с записью в плавильном журнал-наряде.

8.3.11 Контроль массы жидкого металла в ковше

8.3.12 Отбор проб по ходу плавки и ковшевых. Отправка их в лабораторию.

8.4 Заместитель начальника цеха по производству.

Поплавочный контроль соблюдения технологии выплавки и разливки стали.

9. БЕЗОПАСНОСТЬ ТРУДА

9.1 Сталевары, подручные обязаны знать и уметь выполнять все возложенные на них технологические операции с учетом правил охраны труда в соответствии с квалификацией по тарифно-квалификационному справочнику.

9.2 Контроль за правильным и безопасным выполнением операций по выплавке стали возлагается на сменного мастера.

9.3 При выполнении работ необходимо руководствоваться следующими инструкциями по охране труда:

9.3.1 Инструкцией по охране труда для сталеваров и подручных дуговой электропечей.

9.3.2 Инструкцией по безопасному ведению стропальных работ.

9.4 Работающие на электропечи должны быть обеспечены спецодеждой, спецобувью и предохранительными приспособлениями согласно установленным типовым отраслевым нормам соответственно профессиям:

- костюм суконный ГОСТ 12.4.045-87;
- ботинки рабочие;
- шляпа войлочная или каска защитная ГОСТ 12.4.091-80;
- очки защитные козырьковые ГОСТ 12.4.013-85;
- рукавицы (брезентовые) ГОСТ 12.4.010-75;
- рукавицы (вачеги) ТРОСТ 17-535-75.

9.5 Спецодежда, спецобувь и защитные средства должны быть в исправном состоянии. Надевать всю одежду полагается на выпуск. Запрещается работать в расстегнутой спецодежде.

9.6 Не допускается выполнение работ, не входящих в круг прямых обязанностей, без разрешения администрации.

9.7 Не допускается присутствие посторонних лиц на площадке электропечи.

9.8 Все инструменты и приспособления, используемые в процессе работы, должны быть исправными, сухими. Инструменты, подвергаемые контакту с жидким металлом в процессе технологических операций, до погружения в жидкий металл необходимо подогреть над поверхностью металла или шлака в течении 10-15 секунд, что обеспечит нагрев до 100-150 градусов по Цельсию.

10. РАБОЧИЙ ИНСТРУМЕНТ СТАЛЕВАРА, ЗАЛИВЩИКА

10.1 Лопатка совковая; ложка для отбора проб;
10.2 Штырь для пробивки и чистки сталевыпускного отверстия;
10.3 Кочерга;
10.4 Скребок для скачивания шлака;
10.5 Штанга для перемешивания металла;
10.6 Скребок для очистки подины;
10.7 Штырь для сталкивания шихты с откосов;
10.8 Чалка для транспортировки электродов;
10.9 Зубило;
10.10 Молоток;
10.11 Кувалда тупоноса.