

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ

**МЕНЯЙЛО ОЛЕНА ВАЛЕРІЇВНА**



УДК 669.18(075.8)

**НАУКОВІ І ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ  
ПРОЦЕСІВ СПРЯМОВАНОГО ТВЕРДІННЯ МАСИВНИХ ВИЛИВКІВ ІЗ  
ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВИХ СПЛАВІВ У КОМБІНОВАНИХ  
КОКІЛЬНО-ПІЩАНИХ ФОРМАХ**

Спеціальність 05.16.04  
«Ливарне виробництво»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національній металургійній академії України, м. Дніпро

**Науковий консультант:** доктор технічних наук, професор  
**Пройдак Юрій Сергійович,**  
Національна металургійна академія України,  
м. Дніпро, проректор з наукової роботи

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор  
**Афтанділянц Євгеній Григорович,**  
Національний університет біоресурсів і  
природокористування України,  
завідувач кафедри технології конструкційних матеріалів і  
матеріалознавства, м. Київ

доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Бубликов Валентин Борисович,**  
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів  
НАН України, завідувач відділу, м. Київ

доктор технічних наук, доцент  
**Могилатенко Володимир Геннадійович,**  
Національний технічний університет України,  
"Київський політехнічний інститут імені  
Ігоря Сікорського" МОН України, професор кафедри  
ливарного виробництва чорних та кольорових металів,  
м. Київ

Захист відбудеться «24» вересня 2020 р. об 11<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.232.01 у Фізико-технологічному інституті металів та сплавів НАН України за адресою: 03142, м. Київ, бульв. Академіка Вернадського, 34/1

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України за адресою: 03142, м. Київ, бульв. Академіка Вернадського, 34/1

Автореферат розісланий «\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 26.232.01  
доктор технічних наук



М.І. Тарасевич

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Вальцеливарні підприємства України забезпечують металургійні і машинобудівні заводи валками листопрокатні, сортопрокатні і трубопрокатні стани, а також виготовляють валки та ролики бумаго- і картоноробні, гумотехнічні, мукомольні, маслобойні і фарботерочні. Чорнова маса валків становить від 0,5 до 49 т, а 68-70% відливають з високоміцного чавуну.

При виробництві прокатних валків, твердіння яких відбувається у комбінованих кокільно-піщаних формах, непродуктивні витрати металу на надливи складають 23-28%, що вище ніж у злитків з вуглецевої сталі. Це пов'язано з більшою густиною металу відбіленого шару бочки валка. В даний час для масивних виливків застосовують технологію електродугового-електрошлакового обігріву (ЕШО) надливу, яка забезпечує усунення усадкових дефектів у верхній шийці. На АТ "Дніпропетровський завод прокатних валків" (ДЗПВ) тривалість ЕШО встановлюють достатньо приблизно: для валків масою до 10 т – 5 год, і більшою – 7 год. При цьому не враховують розміри бочки та шийок, різну швидкість їх твердіння, усадки і охолодження в комбінованих кокільно-піщаних формах. Відсутність цих даних призводить до збільшення витрат на електроенергію, шихтові матеріали, електроди, флюси і зростання перепаду температур по висоті виливка.

Одиничне та дрібносерійне виробництво прокатних валків ускладнено тим, що згідно технічних умов основними параметрами валків є глибина і твердість робочого шару бочки та масова частка хімічних елементів у робочому шарі. В осьовій зоні бочки і шийок контроль здійснюють за мікроструктурою, а масова частка хімічних елементів не регламентується. Нез'ясованими залишилися особливості спрямованого твердіння прокатних валків, тривалість ЕШО надливів з регульованими режимами витрати електроенергії, вплив комбінованої кокільно-піщаної ливарної форми на кінетику усадки, тривалість перебування Fe-C сплавів в інтервалі температур затвердіння, а також у рідко-твердій і твердо-рідкій зонах, в яких утворюються усадкові дефекти та гарячі тріщини. Крім того, технологію ЕШО можливо використовувати при виробництві масивних сталевих злитків для ковальського перероблення, що обумовлено утворенню усадкових дефектів в зв'язку з низькою тривалістю дії екзотермічних і теплоізолюючих сумішей у надливі. Твердінні виливків досліджували видатні вчені Б.Б. Гуляєв, М.І. Хворінов, А.І. Вейник, В.О. Ефімов, А.Є. Кривошеєв, М.П. Котешов та ін. Але до сьогодні не визначено для більшості виливків з різним вмістом вуглецю значення тривалості виливання, ліквідус, солідус, особливості процесів твердіння центральних зон виливків плоскої, циліндричної і кульової форми. Досі питання підвищення швидкості твердіння центральних зон виливків плоскої, циліндричної та кульової форм, зменшення кількості цементиту у структурі осьової зони прокатних валків і утворення гарячих тріщин у валках з литими калібрами, є дискусійними.

Таким чином, робота, яка направлена на встановлення наукових і технологічних процесів спрямованого твердіння масивних виливків із залізовуглецевих сплавів у комбінованих кокільно-піщаних формах, усунення усадкових дефектів, зменшення енергозатрат та перепаду температур по висоті виливка, є актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами темами.** Робота є результатом закінченого циклу науково-дослідних робіт, що проводилися кафедрою ливарного виробництва Національної металургійної академії України (ДР 0210U001444, ДР 0110U003236, ДР 0105U000704, ДР 0115U003177, 0110U003264). Автор дисертації була виконавицею цих робіт.

**Мета і задачі дослідження.** Мета роботи – встановити закономірності процесів спрямованого твердіння масивних виливків із Fe-C сплавів у кокілях та комбінованих кокільно-піщаних формах, кінетику об'ємної усадки і тривалість електродугового-електрошлакового обігріву надливу, визначити час просування межі ліквідус, виливання, солідус до центру виливків циліндричної, пласкої і кульової форми, знаходження розплаву в рідко-твердому і твердо-рідкому стані та визначити умови попередження утворення гарячих тріщин у чавунних валках з литими калібрами.

Для досягнення поставленої мети сформульовані наступні завдання:

1. Встановити кінетику об'ємної усадки прокатних валків з високоміцного чавуну і вплив комбінованої кокільно-піщаної ливарної форми на тривалість живлення усадки розплаву з надливів.

2. Встановити умови спрямованого твердіння чавунних та сталевих прокатних валків і призначити режими регульованого електродугового-електрошлакового обігріву надливу.

3. Встановити вплив вмісту вуглецю у Fe-C сплавах на тривалість твердіння циліндричних, пласких і кульових виливків, які охолоджуються у кокільних формах.

4. Встановити тривалість перебування Fe-C сплавів в інтервалі температур затвердіння, а також у рідко-твердій і твердо-рідкій зонах виливків, в яких утворюються усадкові дефекти і гарячі тріщини.

5. Установити умови збільшення швидкості твердіння центральних зон виливків пласкої, циліндричної і кульової форми.

6. Визначити масу графітізуючого модифікатору і час його введення у рідко-тверду серцевину після затвердіння у кокілі шару металу заданої товщини з метою зменшення кількості цементиту і транскристалічності структури в осьовій зоні чавунних прокатних валків.

7. Розробити пропозиції щодо попередження утворення гарячих тріщин у валках з литими калібрами.

8. Провести випробовування режимів електродугового-електрошлакового обігріву надливів масивних виливків з Fe-C сплавів і впровадити результати досліджень у промислове виробництво і навчальний процес.

**Об'єкт дослідження.** Процес спрямованого твердіння прокатних валків і злитків із залізовуглецевих сплавів.

**Предмет дослідження.** Закономірності живлення усадки, утворення усадкових дефектів та твердіння чавунних і сталевих виливків у комбінованих кокільно-піщаних ливарних формах.

**Методи дослідження.** Для вирішення поставленої задачі в роботі були використані загальноприйняті та стандартні методи, методики і апаратура, оригінальні методики, які дозволили встановити об'єктивний взаємозв'язок між

досліджуваними параметрами. Теоретичні дослідження процесів твердіння виливків в комбінованих кокільно-піщаних ливарних формах базуються на закономірностях теорії тепломасоперенесення і термічного аналізу. Лабораторні та промислові дослідження виконано з використанням сучасного обладнання та вимірювальних приладів, підданих метрологічній повірці. Спрямоване твердіння виливків у системі прокатний валок–надлив досліджували за допомогою методів математичного моделювання технологічних процесів; результати експериментальних досліджень опрацьовані з використанням методів математичної статистики.

**Наукова новизна.** Наукову новизну складають наведені нижче результати теоретичних і експериментальних досліджень.

1. *Вперше одержані експериментальні результати кінетики об'ємної усадки прокатних валків з високоміцного чавуну масою від 2,2 т до 17,2 т в процесі твердіння в комбінованих кокільно-піщаних формах дозволили встановити, що максимальна усадка відбувається при затвердінні рідко-твердої фази бочки і досягненні межі виливання центру виливку.* Раніше такі данні не були відомі. За результатами досліджень перший етап електродугового-електрошлакового обігріву надливу почали проводити з найвищою витратою електроенергії, а другий – з мінімальною силою струму та напруги.

2. *Вперше науково обґрунтовано та встановлено неможливість живлення усадки виливка вже після роз'єднання залишкового розплаву на замкнуті ізольовані обсяги в твердо-рідкій зоні.* Раніше такі данні не були відомі, а тривалість твердіння надливу дорівнювали тривалості твердіння 100% твердої фази виливка. Зменшення тривалості обігріву надливу забезпечило зниження витрати електроенергії, графітованих електродів, флюсів, термічних напружень по висоті виливку і збільшення оборотності кокільного і опочного оснащення.

3. *Вперше теоретично визначено вплив вмісту вуглецю у сплавах Fe-C на критерій Гуляєва Б.Б. при твердінні рідко-твердої і твердо-рідкої зон виливків плоскої, циліндричної і сферичної форми кокілю, що дозволило прогнозувати процес живлення усадки з надливу і розподіл усадкової шпаристості у виливках.* Такі дані відомі для декількох сплавів, але відсутні для діапазону 0,04...4,83%С. Отримані результати дозволяють корегувати вміст хімічних елементів в сплаві у заданому інтервалі для зменшення усадкової шпаристості, встановлювати зони з максимальною тривалістю перебування розплаву виливка в рідко-твердому стані у порівнянні з твердо-рідким, в якому утворюється усадкова шпаристість.

4. *Вперше науково обґрунтовано та встановлено вплив хімічного складу Fe-C сплавів у діапазоні 0,04...4,83 %С на тривалість твердіння осьової зони масивних циліндричних, сферичних і плоских виливків для межі виливання, ліквідус, солідус, що підвищило точність розрахунків і дозволило розробити умови спрямованого твердіння у системі виливок – надлив.* Раніше такі данні були відомі для окремих найбільш поширених сплавів. Отримані залежності у

критерії  $\tau/R^2$  дозволяють розрахувати тривалість різних етапів твердіння виливків пласкої, циліндричної і сферичної форм, а також проводити адаптацію математичних програм моделювання процесів твердіння.

5. *Вперше теоретично визначено та експериментально перевірено закономірності тривалості обігріву надливу по кінетиці усадки комплекснолегованих і модифікованих сплавів з різними температурно-часовими режимами заливання і теплофізичними властивостями ливарної форми, за якими процес обігріву необхідно припиняти з моменту закінчення переміщення електродів у надлив.* Такі дослідження раніше не проводилися для великої кількості сплавів через відсутність даних про об'ємну усадку і вплив на процес спрямованого твердіння температури, швидкості заливання, хімічних елементів, маси, товщини стінки та інше. Запропоновані закономірності дозволили скоротити тривалість обігріву, витрату електроенергії, зменшити перепад температур по висоті виливку і рівень залишкових ливарних напружень.

6. *Вперше встановлено залежності співвідношення розмірів різних частин прокатного валка з високоміцного чавуну на утворення усадкових дефектів по критерію  $\tau/R^2$  для межі живлення бочки і шийок при  $x/R=1$ , що встановлюють умови відсутності дефектів в нижній або верхній шийках і бочці, яка охолоджується у коклі з ливарною фарбою або з теплоізоляційним покриттям.* Раніше утворення прихованої усадкової шпаристості визначали тільки в осьовій зоні нижніх шийок валків з бочкою діаметром не більше 450 мм з моменту досягнення межі солідус центру виливка. Розроблені залежності, що розраховані по показнику проникнення межі живлення центру виливка, дозволяють більш точно прогнозувати виникнення усадкових дефектів та розробляти технологічні заходи для спрямованого твердіння виливків.

7. *Вперше запропоновано гіпотезу процесу прискореного твердіння центральних зон виливків пласкої, циліндричної і кулястої форми по гетерогенному механізму, при якому гілки дендритів є додатковими центрами кристалізації.* Раніше прискорене твердіння центральних зон виливків кулястої, циліндричної і пласкої форм було експериментально підтверджено, але для пласких виливків не пояснені причини цього процесу. Це дозволить цілеспрямовано впливати на процес затвердіння тільки центральних зон масивних виливків з метою отримання заданих фізико-механічних властивостей, макро- і мікроструктури.

### **Практичне значення одержаних результатів.**

1. Розроблені режими комбінованого електродугового-електрошлакового обігріву надливів чавунних прокатних валків, які враховують інерційність процесу охолодження металевої ванни, живлення усадки через двофазову зону, які забезпечують скорочення в 1,5-2,5 рази тривалість обігріву для кожного окремого типорозміру прокатного валка у порівнянні з тривалістю ЕШО, що діяла раніше, 5 годин для валків масою <10 т та 7 годин – для валків  $\geq 10$  т. Впроваджено у вальцеливарному цеху АТ «ДЗПВ» (м. Дніпро, акт від 01.12.2015 р).

2. При освоєнні нової технології лиття прокатних валків із заевтектоїдної сталі 150ХНМ успішно апробовані і впроваджені режими комбінованого електродугового-електрошлакового обігріву надливу, які забезпечили спрямовано твердіння виливків. Відсутність усадкових дефектів у валках підтверджено УЗК контролем. Впроваджено у вальцеливарному цеху АТ «ДЗПВ» (Акт від 18.11.2016 р).

3. Розроблено регульований режим обігріву надливів прокатних валків зі зменшенням максимальної сили току і напруги після досягнення межі виливання центру бочки валка, що забезпечило скорочення витрати електроенергії і тривалості охолодження вилівка (пропозиції внесені у технологічну інструкцію ТИ-00187375-Л-91-2017 і впроваджені на АТ «ДЗПВ»).

4. Розроблена технологія ЕШО надливу масивних виливків зі сплавів з різними температурно-часовими режимами заливання, теплофізичними властивостями ливарної форми і невідомою об'ємною усадкою, за якою процес обігріву необхідно припиняти з моменту закінчення переміщення електродів у надлив. Прийнято к розробленню та впровадженню на АТ «ДЗПВ» (Акт від 20.03.2017р).

5. Використання розроблених графоаналітичних залежностей дозволило:

- встановити можливість утворення усадкових дефектів у нижній шийці прокатного валка і обґрунтувати розміщення кільцевого зовнішнього чавунного холодильника, мінімальна товщина якого прискорила твердіння розплаву у нижній шийці порівняно з бочкою, а разом з ЕШО надливу забезпечити спрямоване твердіння вилівку;

- зменшити усадкові дефекти у прокатних валках нових типів з конічними шийками, циліндричними трєфами і діаметром бочки у два рази більше, ніж трєфи за рахунок встановлення режимів ЕШО надливів;

- встановити час введення та масу графітизуючого модифікатору у рідке осереддя валка після затвердіння робочого шару чавуну заданої товщини, що забезпечило зменшення кількості цементиту і транскристалічності структури в осьовій зоні виливків різних типорозмірів.

6. Розроблено новий спосіб і пристрій (у співавторстві) для виробництва виливків і злитків з газодинамічним впливом на метал, що кристалізується, і одночасним електрошлаковим обігрівом надливу, тривалість якого розраховували за розробленою у роботі технологією: при відсутності переміщення електроду обігрів припиняли.

7. Розроблено рекомендації щодо попередження утворення гарячих тріщин у валках з литими калібрами, за якими на виступаючу частину ливарної форми необхідно нанести ультрадисперсний модифікатор для подрібнення мікроструктури тільки у заданій ділянці вилівка.

8. Впроваджено в учбовий процес учбовий посібник і 6 практичних робіт, з них 5 одноосібно, без співавторів (акт Національної металургійної академії України від 23.01.2020 р).

**Особистий внесок здобувача.** У дисертації не використані ідеї співавторів. Всі наукові та теоретичні положення дисертаційної роботи

сформульовані автором особисто і базуються на результатах проведених досліджень, промислових випробувань та подальшому їх впровадженні. Публікації [2, 6–9, 11, 13, 14, 26, 35, 43, 45] є одноосібними. Особистий внесок здобувача у публікаціях із співавторами полягає у наступному: [3,4,54] – узагальнення результатів експериментальних та теоретичних досліджень процесі в твердіння високоміцного чавуну у складних ливарних формах; [2,15] – розробка методу попередження утворення гарячих тріщин; [5,35] – підготовка методики, проведення експериментів і встановлення впливу кокільно-піщаної ливарної форми на кінетику об'ємної усадки валків; [10,36,47] – встановлення теплофізичних процесів роботи надливу; [12,22] – узагальнення особливостей впливу макроструктури на зародження тріщин; [17,24] – розробка методики оцінки витрати металу на надлив; [38,39,52] – встановлення впливу термочасових режимів лиття на процеси твердіння чавунних валків; [18,19] – вплив комбінованої кокільної і піщаної ливарних форм на положення кордону виливання високоміцного чавуну; [37,41,42] – результати експериментальних досліджень і встановлення закономірностей процесів твердіння; [20] – обґрунтування та вибір початкових граничних даних для моделювання на ПК; [21,29,49] – теплофізичні умови утворення усадкової шпаристості; [27] – розрахунок раціонального часу ЕШО надливів сталевих валків; [30,44] – розрахунок часу ЕШО надливів чавунних валків; [31,40] – встановлення впливу процесу твердіння на розподіл неметалевих вкраплень у виливках; [32] – розробка особливостей конструкції надливу з графітовим пристроєм у вигляді поплавця; [33] – розрахунок тривалості ЕШО надливу та плавучості графітованих електродів; [34] – розрахунок температурних режимі процесу охолодження робочого шару бочки валка; [48,50] – розробка умов спрямованого твердіння чавунних прокатних валків; [16,23,28] – обґрунтування та формулювання процесів УДП модифікування частини виливка, де можливо утворення гарячої тріщини; [51,53] – обґрунтування теплофізичних процесів модифікування додатковими центрами кристалізації; [55] – розділи 6.3-6.6, 10.1, 10.2.

**Апробація результатів дисертації.** Наукові положення та результати роботи представлені та обговорені на міжнародних конференціях у період з 2009 по 2019 рр: «Перспективні технології, матеріали та обладнання у ливарному виробництві» (м. Краматорськ, 2009 р.); «Литво 2010» (м. Запоріжжя, 2010 р.); «Литво 2011» (м. Запоріжжя, 2011 р.); «Литво 2012» (м. Запоріжжя, 2012 р.); «Перспективні технології, матеріали та обладнання у ливарному виробництві» (м. Краматорськ, 2013 р.); «Литво 2013» (м. Запоріжжя, 2013 р.); «Литво 2015» (м. Запоріжжя, 2015 р.); «Перспективні технології, матеріали та обладнання у ливарному виробництві» (м. Краматорськ, 2015 р.); «Литво 2016» (м. Запоріжжя, 2016 р.), «Нові матеріали і технології в машинобудуванні» (м. Київ, 2016 р.); XVII International Scientific Conference «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering» (Czestochowa, 2016); XVIII International Scientific Conference «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering» (Czestochowa, 2017); «Литво 2017» (м. Запоріжжя,



2017 р.); «Нові матеріали і технології в машинобудуванні» (м. Київ, 2017 р.); «Перспективні технології, матеріали та обладнання у ливарному виробництві» (м. Краматорськ, 2017 р.), «Теплотехніка, енергетика та екологія в металургії» (м. Дніпро, 2017 р.), «Литво. 2018» (м. Запоріжжя, 2018 р.), Неметалеві вкраплення і гази у ливарних сплавах (м. Запоріжжя, 2018 р.), «Литво. Металургія. 2019» (м. Запоріжжя, 2019 р.), «Перспективні технології, матеріали й обладнання в ливарному виробництві» (м. Краматорськ, 2019 р.).

**Публікації.** Основні положення дисертаційної роботи викладені у 55 друкованих працях: 23 статті у спеціалізованих фахових виданнях, з них 10 одноосібних, 4 англomовні статті – у виданнях, зареєстрованих у міжнародних наукометричних базах даних (Scopus), 3 патенти, 1 закордонне видання, 7 статей у виданнях, що не входять до переліку фахових, 1 посібник МОН України та 20 тез доповідей за матеріалами науково-технічних конференцій. Перераховані публікації не містять матеріалів кандидатської дисертації.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел із 252 найменувань, 9 додатків і містить 213 сторінок основного машинописного тексту, у тому числі 82 рисунки та 18 таблиць.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** обґрунтовано актуальність наукової проблеми, сформульовано мету й завдання дослідження, показано зв'язок з науково-дослідними роботами. Наведено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів.

**У першому розділі** наведено аналіз науково-технічної літератури за темою дисертації, розглянуто існуючі положення розрахунково-експериментальних методів визначення розмірів усадкових дефектів, надливів та спрямованого твердіння виливків. Їх придатність обмежена насамперед через трудомісткість виконання експериментів при литті масивних виливків, а різні припущення та поправкові коефіцієнти у розрахунках дозволяють тільки у першому наближенні оцінювати розподіл усадкових дефектів у залежності від стану сплаву на діаграмі Fe-C. Так, коефіцієнт тверднення у рівнянні квадратного кореня однаковий для виливків зі сталі при вмісті вуглецю до 2% та – для чавунів. Але кожен окремий хімічний склад сплавів Fe-C має свій час твердіння, що вказує на необхідність уточнення цих розрахунків. При математичному моделюванні процесів твердіння основні теплофізичні властивості рідкого металу та ливарної форми при високих температурах змінюються і відомі тільки орієнтовно. Точність результатів розрахунку багато в чому залежить від адаптації моделі до реальних процесів затвердіння сплаву, які отримані найчастіше за допомогою експериментальних термографічних досліджень. Наведено технологічні особливості лиття прокатних валків. Відзначено, що в шийках і осередді здійснюється контроль тільки мікроструктури по формі графіту; в листопрокатних валках карбідних включень не повинно бути більше 10% площі мікрошліфа; в сорто- та трубопрокатних – карбідна сітка не допускається та ін.

Сформульована мета роботи, а також наукові та практичні завдання.

У другому розділі наведено використані методики досліджень, матеріали та обладнання. Температуру розплавів та термічний аналіз твердіння масивних виливків проводили хромель-алюмельовими або вольфрам-ренієвими датчиками температури. Аналіз кривих охолодження, побудову температурного поля, кінетичної діаграми тверднення, ізотерм та ізохрон здійснювали за стандартними методиками. Температури ліквідус, солідус і фазових перетворень окремих флюсів визначали методом високотемпературного диференціального термічного аналізу. Реєстрацію зміни рівня розплаву у надливі і об'ємної усадки в процесі затвердіння виливка фіксували по переміщенню електродоутримувача установки електрошлакового обігріву: реохорд закріплювали на несучій рамі, а рухливий контакт – на боковій поверхні електродоутримувача. Результати виміру кінетики переміщення у часі записували з точністю  $\pm 0,25$  мм на двокоординатному потенціометрі.

Експериментальні результати термографічних досліджень представлені за методикою Б.Б. Гуляєва, яка заснована на використанні критерію Фур'є, в якому  $a\tau/R^2$  замінено критерієм  $\tau/R^2$ . Температуропровідність  $a$  введена у кінцеве значення чисельного результату вимірювання у зв'язку із застосуванням ливарної форм з постійним значенням коефіцієнту температуропровідності (чавунного кокілю або піщаної форми), а на осі ординат відкладений відносний розмір виливка  $x/R$ . Тому для розрахунку часу твердіння використовували формулу:

$$\tau = Fo \frac{c\rho}{\lambda} R^2 = AR^2.$$

Коефіцієнт  $A$  узагальнює теплофізичні властивості сплаву, які змінюються на протязі твердіння шару металу  $x/R$  від 0 до 1. Це принципово відрізняється від рівняння квадратного кореню, у якому коефіцієнт твердіння постійний.

Співвідношення часу твердіння напівнескінчених виливків форми "плита", "циліндр" "куля" приймали як 1:0,25:0,11 згідно закону М.І. Хворінову. Сірчані відбитки з темплетів та дисків дослідних виливків виконували за методом Баумана. Густина металу досліджували методом гідростатичного зважування зразків у чотирьоххлористому вуглеці і на повітрі, мікроструктуру чавунів – на оптичних мікроскопах з застосуванням кількісного аналізу складових мікроструктури; хімічний аналіз – на спектрометрі GDS500A LECO і експрес-аналізаторі "EXPERT 3L".

Розподіл усадкових дефектів встановлювали спільно з інженерами-дефектоскопістами ДЗПВ системою інтегрованого контролю фірми "Datames", яка закріплена на супорті вальцетокарного верстату і забезпечує автоматичну подачу вимірювальної головки з вбудованими датчиками до прокатного валку. Поєднання обертання валка і поздовжнього переміщення вимірювальної головки забезпечує спіральне сканування раковин, шпаристості, тріщин, а також глибину робочого шару. Моделювання процесів твердіння виконували за допомогою математичної моделі, що раніше була розроблена та адаптована у НМетАУ згідно з експериментальними даними у вигляді еталону, в якому для встановлення процесів спрямованого твердіння виливків різних типорозмірів і

хімічних складів металу змінювали вихідні дані, сіткову область і теплофізичні коефіцієнти.

**У третьому розділі** наведено результати експериментальних досліджень і теоретичних положень процесів спрямованого твердіння прокатних валків з високоміцного чавуну, визначено кінетику об'ємної усадки прокатних валків з високоміцного чавуну (ВЧ) масою 3,6 т (рис. 1), що мають різне співвідношення діаметрів бочки, шийок і висоту (табл. 1).

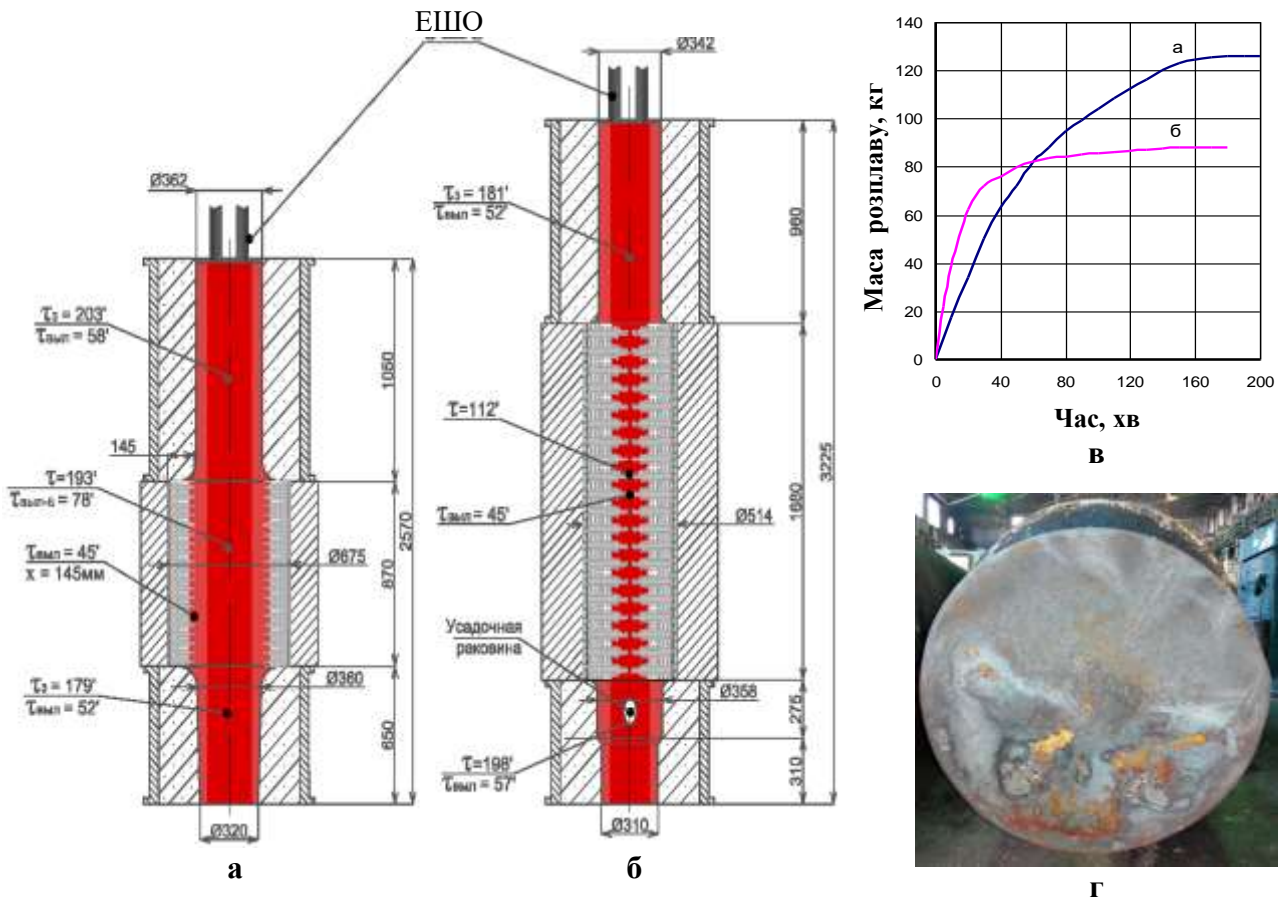


Рис. 1 – Кінетика об'ємної усадки (в) прокатних валків з ВЧ масою 3,6 т, що мають різне співвідношення діаметрів бочки, шийок і висоту (а, б) та торець надливу (г) після ЕШО

Таблиця 1 – Основні розміри прокатних валків масою 3,6 т

Найменування валка	Бочка, мм		Нижня шийка, мм		Верхня шийка та надлив, мм	
	Діаметр	Висота	Діаметр	Висота	Діаметр	Висота
№1	675	870	320-360	650	362	1050
№2	514	1680	310-358	585	342	960
№1/№2	1,31	0,52	1,03-1,01	1,11	1,06	1,09

Кінетику об'ємної усадки фіксували за переміщенням графітованих електродів установки ЕШО слідом за усадкою рівня чавуну у надливі. Дзеркало металу у надливі було плоским, без настилів затверділого шару металу на стінках форми (рис. 1 г), що дозволило визначити об'ємну усадку валків: 3,5% (див. рис. 1а) та 2,4% (див. рис. 1б). Різні значення цих показників при

однаковій масі валків обумовлено утворенням усадкових дефектів у нижній шийці валка №2.

Розрахунки з використанням критерію Б.Б. Гуляєва показали переміщення межі виливання (рис. 2) в осьову зону бочки через  $\tau_B=45$  хв, що порушує рух розплаву з надливу через бочку у нижню шийку. У нижній шийці межа виливання досягне центру пізніше, через 57 хв, а загальна тривалість твердіння складе 198 хв. У валку №1 (див. рис. 1а) межа виливання у бочці через 45 хв досягне лише глибини 145 мм і не порушить переміщення розплаву з надливу у нижню частину вилівка.

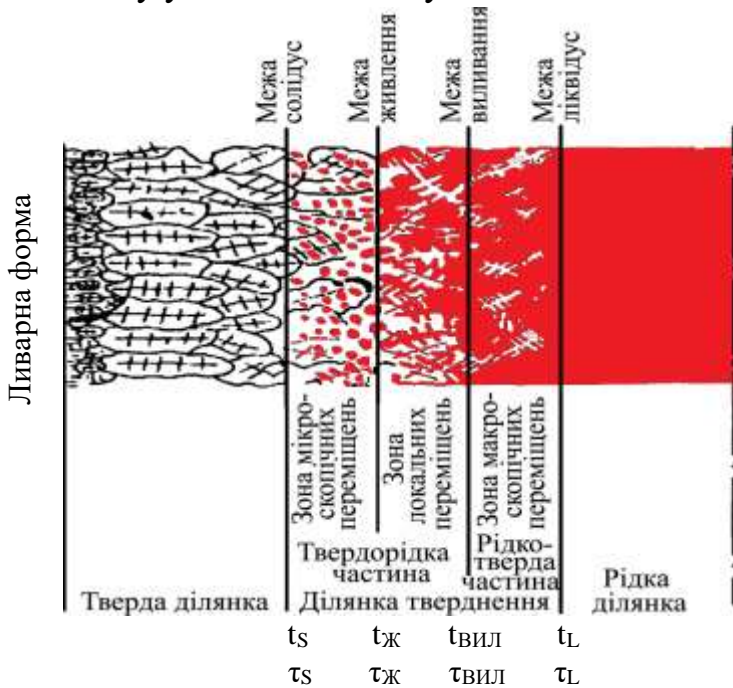


Рис. 2 – Схема формування кристалічної структури і просування межі твердіння згідно Б.Б. Гуляєву

склала лише 22,4 мм, а у верхній – 20,7 мм. У валка №2 (див. рис. 1б) через 45 хв у нижній шийці затвердіє шар металу товщиною 17,0 мм, а у верхній – лише 16,5 мм. Крім того, кількість цементиту у структурі шийок у 6–10 разів менше, ніж у бочки, що обумовлює меншу усадку.

Таким чином, максимальна об'ємна усадка фіксується при досягненні межі виливання центру бочки і тому на останньому етапі ЕШО можливо зменшити силу струму і скоротити витрати електроенергії.

Експериментально встановлено кінетику об'ємної усадки прокатних валків з ВЧ: масою 8,86 т – 4,1% (363 кг), 14,12 т – 2,6% (369 кг) і 17,22 т – 3,9% (668 кг). Максимальна усадка чавуну відбувається при твердінні рідко-твердої частини бочки і шийок і складає 76-99%. Встановлено, що для валка масою 8,86 т (рис. 5) тривалість затвердіння 100% твердої фази у верхній шийці дорівнює  $\tau_{S-ВШ}=330$  хв, а усадка припиниться значно раніше через 215 хв. Для валка масою 14,12 т (рис. 4)  $\tau_{S-ВШ}=392$  хв, а усадка закінчується на 250 хв і валка масою 17,22 т (рис. 3)  $\tau_{S-ВШ}=354$  хв і усадка припиняється на 240 хв – на 114 хв раніше. Таким чином, недоцільно продовжувати ЕШО до утворення

Встановлено, що максимальна усадка проходить при твердінні бочки валків, а саме у процесі переміщення межі виливання від кокілю в осьову зону. Так, у валка №1 (див. рис. 1а) 77,5% рідкого чавуну перейшло з надливу у валок при значенні  $\tau_B=78$  хв, а у валка №2 – 89% при  $\tau_B=45$  хв.

Твердіння шийок у піщано-глинистих формах з низькою теплоакумуючою здатністю практично не впливає на кінетику усадки. Так, за 78 хв (див. рис. 1а  $\tau_{вил}$  бочки) у нижній шийці валка №1 товщина затверділого шару чавуну (100% твердої фази)

100% твердої фази у виливку, у той час як живлення усадки з надливу припиняється.

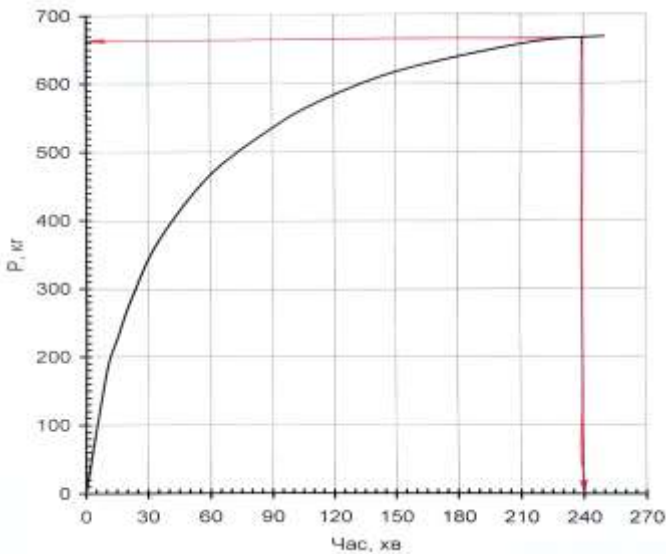


Рис. 3 – Кінетика об'ємної усадки прокатних валків масою 17,22 т СШХНМ-55, мас. %: С-2,95; Si-1,31; Mn-0,70; P-0,043; S-0,009; Cr-0,41; Ni-1,46; Mo-0,24; Cu-0,012; Cr-0,62; Ni-2,86; Mo-0,52; Cu-0,28; V-0,003; Mg-0,052; надлив Ø470мм

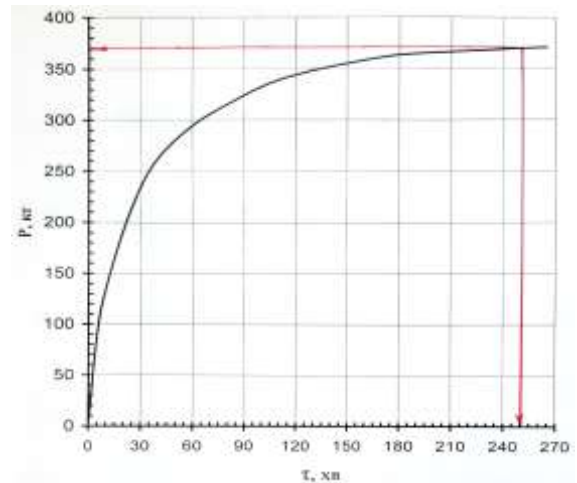
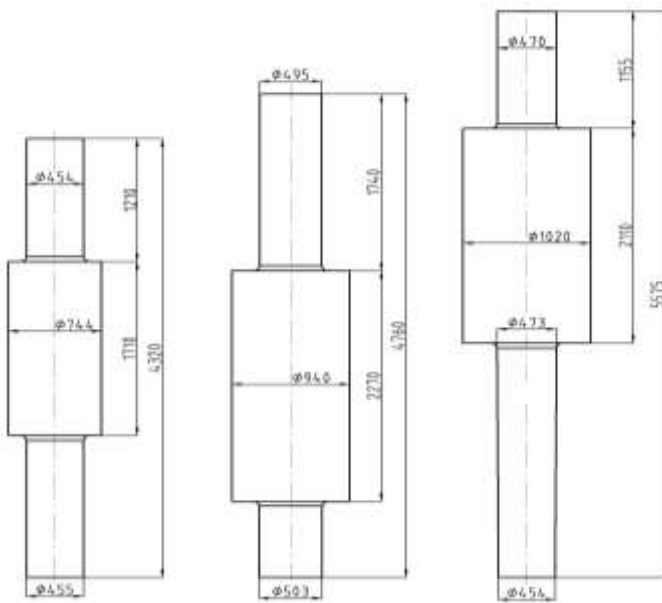


Рис. 4 – Кінетика об'ємної усадки прокатних валків масою 14,12 т виконання СШХНМ-41, мас. %: С-2,92; Si-1,67; Mn-0,63; P-0,038; S-0,009; Cr-0,41; Ni-1,46; Mo-0,24; Cu-0,17; V-0,006; Mg-0,039; надлив Ø495мм



8,86 т

14,12 т

17,22 т

$V_{yc}=4,1\%$  (363кг)  $V_{yc}=2,6\%$  (371кг)  $V_{yc}=3,9\%$  (668кг)

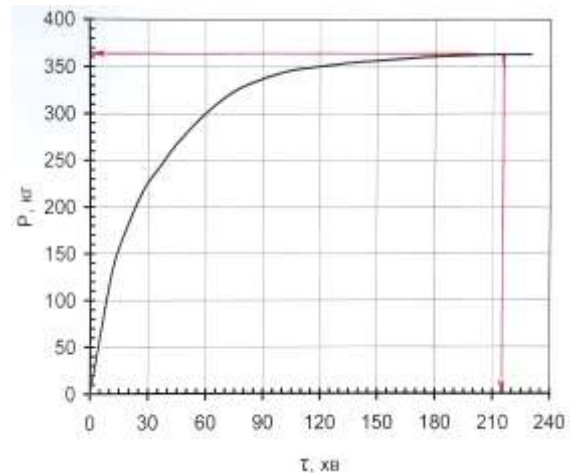


Рис. 5 – Кінетика об'ємної усадки прокатних валків масою 8,86 т виконання СШХНМ-51: С-3,00; Si-1,43; Mn-0,68; P-0,036; S-0,012; Cr-0,51; Ni-2,53; Mo-0,45; Cu-0,30; V-0,004; Mg-0,043; надлив Ø454 мм

Дослідження впливу щільності теплового потоку при ЕШО надливу на температуру по висоті валка на 170 хв впливу показало, що підвищена щільність обігріву  $175,4 \text{ кВт/м}^2$  (1 на рис. 6) та  $117,0 \text{ кВт/м}^2$  (2 на рис. 6) забезпечує більш високі температури нагріву металевої ванни. Але при загальній тривалості твердіння валка 180 хв мінімальний обігрів  $58,0 \text{ кВт/м}^2$  (3 на рис. 6) навіть на 170 хв забезпечує живлення усадки верхньої шийки з надливу. Тому раціонально зменшувати наприкінці ЕШО струм для скорочення непродуктивних витрат енергії і перепаду температури по висоті виливку.



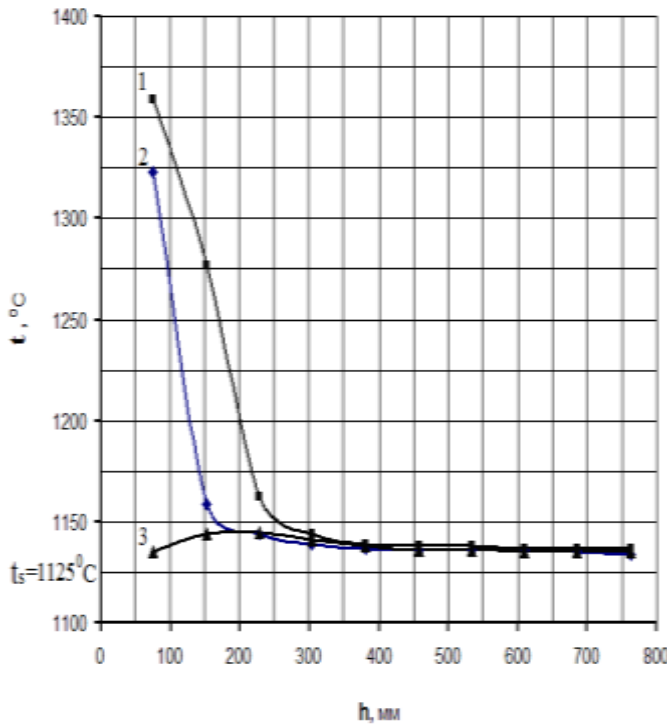


Рис. 6 – Вплив щільності теплового потоку при ЕШО надливу на температуру по висоті валка на 170 хв: 1–175,4 кВт/м<sup>2</sup>; 2–117,0 кВт/м<sup>2</sup>; 3–58,0 кВт/м<sup>2</sup>;  $t_s=1125^\circ\text{C}$  пилоподібними відходами формувальної суміші, так що затверділий піщано-шлаковий шар зменшував втрати тепла випромінюванням в довкілля і збільшував тривалість твердіння металеві ванни, з якої розплав переміщувався через двофазну зону для живлення усадки виливка.

Відповідно до вимог теорії ливарних процесів тривалість твердіння надливу повинна дорівнювати або бути більше тривалості твердіння 100% твердої фази (солідус). В роботі обґрунтована необхідність припинення обігріву раніше при досягненні сплавом межі живлення (див. рис.2), коли припиняється фільтрація розплаву із центру виливка і між гілками дендритів залишки рідкої фази при охолодженні утворюють усадкову шпаристість. Це підтверджують результати експериментальних досліджень живлення усадки валків масою 3,6 т, 8,86 т, 14,12 т, 17,22 т (табл. 2). Встановити точно тривалість досягнення межі живлення центру виливку не представляється можливим на сучасному рівні розвитку науки. Нами запропоновано визначати загальну тривалість ЕШО ( $\tau_{\text{ЕШО}}$ , с) як середнє значення тривалості досягнення межі виливання ( $\tau_{\text{В-ВШ}} = 107000 \text{ с/м}^2 \cdot R_{\text{ВШ}}^2$ ) і солідус ( $\tau_{\text{С-ВШ}} = 107000 \text{ с/м}^2 \cdot R_{\text{ВШ}}^2$ ) осьової частини верхньої шийки або надливу:

$$\tau_{\text{ЕШО}} = 239000 \cdot R_{\text{ВШ}}^2, \quad (1)$$

Тривалість ( $\tau_{\text{Б-В}}$ , с) першого етапу ЕШО з максимальною потужністю обігріву ( $Q$ ) розраховували за моментом досягнення межі виливання осьової зони бочки валка ( $R_{\text{Б}}$ , м):

$$\tau_{\text{Б-В}} = 40900 \cdot R_{\text{Б}}^2, \quad (2)$$

Крім того, максимальний нагрів чавуну тільки до глибини  $\approx 280\text{мм}$  і не впливає на твердіння верхньої шийки. Тому в валках з більшими розмірами бочки (див. рис. 3, 4) утворюються усадкові дефекти наприкінці ЕШО.

Математичне моделювання процесу твердіння показало інерційність передавання тепла з надливу у валок: після відключення обігріву рідка металева ванна з температурою  $\approx 1550^\circ\text{C}$  збільшує тривалість твердіння виливку на  $\approx 25\%$ . Це обумовлено тим, що дзеркало металу надливу закрито шаром розплавленого шлаку, який зменшує втрати тепла у навколишнє середовище. Крім того, після відключення ЕШО дзеркало шлакової ванни засипали сухими

Таблиця 2 – Тривалість живлення усадки, твердіння ( $\tau$ , хв) бочки (Б), шийок нижньої (НШ) та верхньої (ВШ) прокатних валків масою 3,6 т, 8,86 т, 14,12 т, 17,22 т з високоміцного чавуну за критерієм Гуляєва Б.Б. та розрахунок часу припинення ЕШО

Показники об'ємної усадки і тривалості ЕШО	Валок масою, т				
	3,6 (рис.1а)	3,6 (рис.1б)	8,86 (рис. 5)	14,12 (рис. 4)	17,22 (рис. 3)
Об'ємна усадка,% (Маса металу, кг)	3,5 % (124,5)	2,4 % (88)	4,1 % (363)	2,6 % (371)	3,9 % (668)
$\tau_{\text{ВИЛ-Б}}$ , хв (Витрата металу з надливу, %)	78 хв (76%)	45 хв (89%)	113 хв (96%)	181 хв (98%)	212 хв (99%)
$\tau_{\text{S-Б}}$ , хв	193	112	282	450	530
$\tau_{\text{ВИЛ-НШ}}$ , хв (Витрата металу з надливу, %)	52 хв (63%)	57 хв (93%)	93 хв (93%)	113 хв (92%)	100 хв (83%)
$\tau_{\text{S-НШ}}$ , хв	179 хв	198 хв	332 хв	405 хв	358 хв
$\tau_{\text{ВИЛ-ВШ}}$ , хв (Витрата металу з надливу, %)	58 хв (68%)	52 хв (92%)	92 хв (92%)	110 хв (91%)	99 хв (83%)
$\tau_{\text{S-ВШ}}$ , хв	203 хв	181 хв	330 хв	392 хв	354 хв
$\tau_{\text{У}}$ , хв (Витрата металу з надливу,%)	160 хв (100%)	181 хв (100%)	215 хв (100%)	250 хв (100%)	240 хв (100%)
$\tau_{\text{ЕШО}}$ , хв (Витрата металу з надливу,%)	131 хв (95%)	117 хв (98%)	205 хв (99%)	244 хв (99%)	220 хв (99%)
Зменшення тривалості ЕШО у порівнянні з $\tau_{\text{S-ВШ}}$ , хв (%)	72 хв (35%)	64 хв (35%)	125 хв (39%)	148 хв (38%)	134 хв (38%)

Результати досліджень були апробовані і впроваджені в умовах АТ "ДЗПВ". Тривалість ЕШО, наприклад, для надливу  $\varnothing 300$  мм зменшилась на 3,5 год (з 5 до 1,5 год), а для валка масою 12 т з надливом  $\varnothing 500$  мм – на 2 год 51 хв (з 7 до 4 год. 9 хв). УЗК виливків підтвердив відсутність усадкових дефектів у верхніх шийках.

Проте, деякі прокатні валки містять усадкові дефекти у центральній зоні нижніх шийок, що пов'язано з прискореним твердінням бочки і порушенням живлення усадки з надливу (див. рис. 1б). З використанням критерію  $\tau/R^2$  були виведені формули для розрахунку умов утворення усадкових дефектів у нижніх шийках валків (рис. 7б). Встановлено відсутність дефектів, якщо час припинення живлення усадки бочки валка (див. рис. 2) більше або дорівнює часу припинення живлення усадки нижньої шийки ( $\tau_{\text{Б-Ж}} \geq \tau_{\text{НШ-Ж}}$ ). Так, при охолодженні у коклі діаметром  $D_{\text{Б}}$ , внутрішня поверхня якого вкрита ливарною фарбою, тривалість твердіння складе:  $\tau_{\text{Б-ЖФ}} = 0,5 \cdot (40900 + 101700) \cdot R_{\text{Б}}^2 = 71300 \cdot R_{\text{Б}}^2$ , а внутрішня поверхня якого вкрита шаром теплоізоляції:  $\tau_{\text{Б-ТЖ}} = 85560 \cdot R_{\text{БТ}}^2$ .  $\tau_{\text{НШ-Ж}} = 239000 \cdot R_{\text{НШ}}^2$ , то  $85560 \cdot R_{\text{БТ}}^2 \geq 239000 \cdot R_{\text{НШ}}^2$ , або дефекти у нижній шийці відсутні за критерієм  $D_{\text{БТ}} \geq 1,67 \cdot D_{\text{НШ}}$ . У коклі з нанесеною ливарною фарбою усадкові дефекти у нижній шийці відсутні при співвідношенні діаметрів бочки і нижньої шийки за критерієм  $D_{\text{БФ}} \geq 1,83 \cdot D_{\text{НШ}}$ .

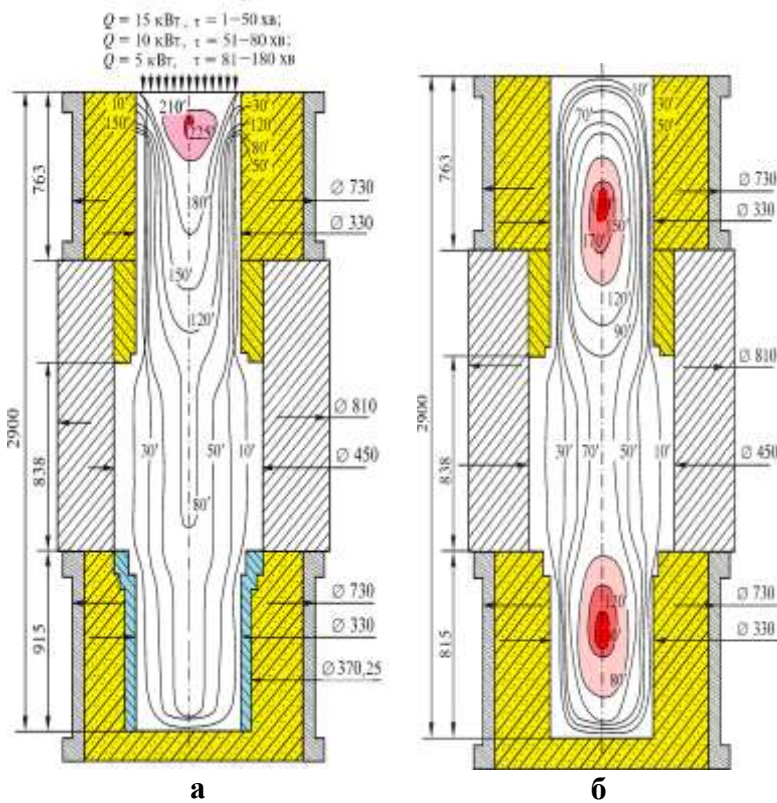


Рис. 7 – Моделювання процесу спрямованого твердіння валка масою 2,2 т з чавунним кільцевим холодильником у нижній шийці та ступінчастого ЕШО надливу (а) у порівнянні з валком-еталоном (б):  $10^1...225^1$  – ізосолідус, хв шийки. Одночасно ступінчастий режим обігріву надливу забезпечив спрямоване твердіння бочки та верхньої шийки (див. рис. 7а).

Встановлено особливості процесу затвердіння чавунних прокатних валків стану 550-2 Дніпровського металургійного заводу, у яких шийки конічні (під нові види підшипників), трефи валків залишилися циліндричними, а діаметр бочки у два і більше разів більше, ніж діаметр трефів (рис. 8). Математичне моделювання процесу затвердіння показало, що тепловий вузол і усадкові дефекти утворюються у зоні з'єднання нижньої шийки і бочки, в осьовій зоні бочки, а також у конусній частині верхньої шийки. З використанням критерію  $\tau/R^2$  виведено формули для розрахунку умов відсутності усадкових дефектів. Встановлено, що у валку з конічними верхніми шийками і циліндричним трефом (т) усадкові дефекти відсутні у бочці, яка охолоджується у коклі вкритому ливарною фарбою, за умови  $D_{\text{БФ}} \leq 1,83 D_{\text{Т}}$ , а у коклі з теплоізоляційним покриттям –  $D_{\text{БТ}} \leq 1,67 D_{\text{Т}}$ .

Розроблено технологію ступеневого режиму ЕШО валків для стану 550-2 (рис. 8б). Тривалість ЕШО зменшено з 5 год (ПІ-00187375-ЛІ-91-2011 ПАТ "ДЗПВ") до 112 хв, тобто зменшено на 3 год 8 хв. Перевірку результатів математичного моделювання проводили на валках для стану 550-2, відлитих 16.02.2015 р з чавуну однієї плавки. УЗК виливків підтвердив встановлений розподіл усадкових дефектів (див. рис. 8). Рекомендовані режими ЕШО впроваджені у вальцеливарному цеху ДЗПВ.

З метою запобігання утворення усадкових дефектів у нижній шийці валка проведено математичне моделювання впливу зовнішнього чавунного холодильника різної товщини на процес спрямованого твердіння валка.

Встановлено, що мінімальна товщина холодильника 20 мм забезпечує прискорене затвердіння тільки металу нижньої шийки порівняно з бочкою (див. рис. 7а). Акумуляване тепло холодильник відводить не в навколишнє середовище, а у формувальну суміш, низька теплопровідність якої обумовлює зменшення кількості крихких цементитних складових у зовнішньому шарі нижньої



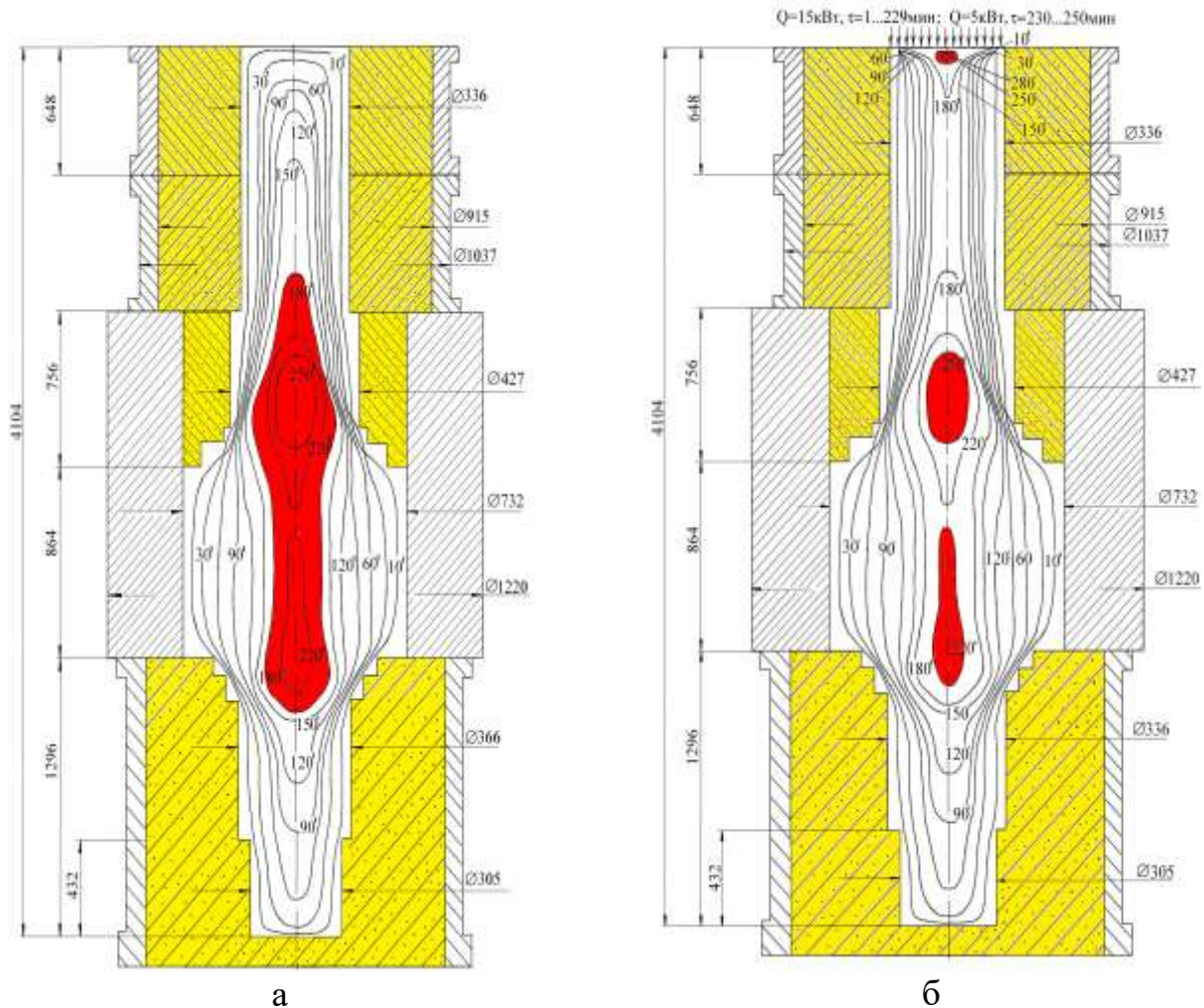


Рис. 8 – Математичне моделювання процесу твердіння чавунних прокатних валків масою 7,5 т стану 550-2 з конічними шийками за технологією АТ "ДЗПВ" (а) і при ЕШО надливу (б):

$10^I, 30^I, 60^I, 90^I, 120^I, 150^I, 180^I, 220^I, 250^I$  – ізосолідус, хв

З метою повторного використання флюсів АН-60, АН-1 проведено дослідження впливу ЕШО надливу на зміну хімічного складу флюсів в шлаковій ванні і температур їх фазових перетворень, отриманих за допомогою високотемпературного диференціального термічного аналізу при швидкості нагрівання і охолодження зразків  $80\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ . Встановлено, що через 60 хв обігріву вміст сірки у шлаковій ванні збільшився у  $\approx 33$  рази (з  $0,022\%$  до  $0,720\%$ ); через 120 хв – у  $\approx 41$  рази (до  $0,910\%$ ); через 180 хв – у  $\approx 38$  разів (до  $0,830\%$ ). Це накладає обмеження на повторне використання флюсу при ЕШО валків з чавуну, що має кулясту форму графіту, оскільки підвищення вмісту сірки у розплаві більше  $0,01\%$  приводить до демодифікування.

Таким чином, для розрахунку спрямованого твердіння чавунних прокатних валків необхідно використовувати формули і критерії (табл. 3), які дозволять встановити тривалість першого етапу ЕШО з максимальною потужністю обігріву при твердінні бочки у кокілі з ливарною фарбою або з теплоізоляційним покриттям, загальну тривалість ЕШО, можливість утворення

усадкових дефектів у нижній шийці прокатних валків стандартного виконання і з конічними шийками і циліндричним верхнім тремом.

Таблиця 3 – Формули для розрахунку умов спрямованого твердіння чавунних прокатних валків

№ п/п	Найменування області використання формул	Розрахункова формула ( $\tau$ , хв; $D$ , мм)
1	Тривалість твердіння (100% твердої фази-солідус) верхньої шийки (або надливу)	$\tau_{S-ВШ} = 1,6 \cdot 10^{-3} \cdot D^2$
2	Загальна тривалість ЕШО за новою технологією	$\tau_{ЕШО} = 0,996 D^2 \cdot 10^{-3}$
3	Тривалість першого етапу ЕШО ( $\tau_{Б-В}$ при $x/R=1$ ) з максимальною потужністю при твердінні бочки у кокілі:	
3.1	– з ливарною фарбою	$\tau_{ЕШО-1} = 0,17 \cdot 10^{-3} \cdot D_B^2$
3.2	– з теплоізоляційним покриттям	$\tau_{ЕШО-1} = 0,204 \cdot 10^{-3} \cdot D_B^2$
4	Тривалість твердіння (100% твердої фази-солідус) бочки валка у кокілі:	
4.1	– з ливарною фарбою	$\tau_{БФ-S} = 0,424 \cdot 10^{-3} \cdot D_B^2$
4.2	– з теплоізоляційним покриттям	$\tau_{БТ-S} = 0,509 \cdot 10^{-3} \cdot D_B^2$
5	Умова відсутності усадкових дефектів у нижній шийці при твердінні бочки у кокілі:	
5.1	– з ливарною фарбою	$D_{БФ} \geq 1,83 D_{НШ}$
5.2	– з теплоізоляційним покриттям	$D_{БТ} \geq 1,67 D_{НШ}$
6	Умова відсутності усадкових дефектів у бочці валка з верхньою конічною шийкою і циліндричним верхнім тремом при твердінні у кокілі:	
6.1	– з ливарною фарбою	$D_{БФ} \leq 1,83 D_{ВШ}$
6.2	– з теплоізоляційним покриттям	$D_{БТ} \leq 1,67 D_{ВШ}$

**У четвертому розділі** узагальнено експериментальні криві твердіння циліндричних виливків з вмістом вуглецю 0,04; 0,1; 0,4; 0,93; 1,42; 2,44; 3,28; 4,45 и 4,83%, охолодження яких відбувалось у чавунному кокілі, виконані Б.Б. Гуляєвим, О.О Магницьким, Л.М. Постновим та ін. Кінетичні криві було оцифровано і інтерпольовано у діапазоні 0,04 ... 4,83 %С і побудовано графік впливу вмісту вуглецю на критерій  $\tau/R^2$  у циліндричних виливках з Fe-C сплавів, які охолоджуються в кокілі. Встановлено тривалість досягнення межі ліквідус, виливання, солідус центральної частини виливку. Тривалість ЕШО (2 на рис. 9) приймали, як було визначено у попередньому розділі, як середнє значення між тривалістю твердіння межі солідус (1) і виливання при  $x/R = 1$ .

Наприклад, для циліндричних виливків з 2%С згідно з рис. 9, для солідус критерій  $\tau/R^2 = 0,1785$  хв/см<sup>2</sup>, а тривалість твердіння складе:  $\tau_{S(2,0C)} = 0,1785 \cdot R^2$  [хв], при  $R$ , см. Тривалість ЕШО дорівнює:  $\tau_{E(2,0C)} = 0,1275 \cdot R^2$  [хв]. Якщо підставити у отримані формули радіус виливка 50 см, то тривалість твердіння складе 446 хв, а тривалість ЕШО – 319 хв. Тобто ЕШО можливо зменшити на 127 хв за формулою  $\tau_{S(2,0C)} - \tau_{E(2,0C)} = 0,051 \cdot R^2$ .

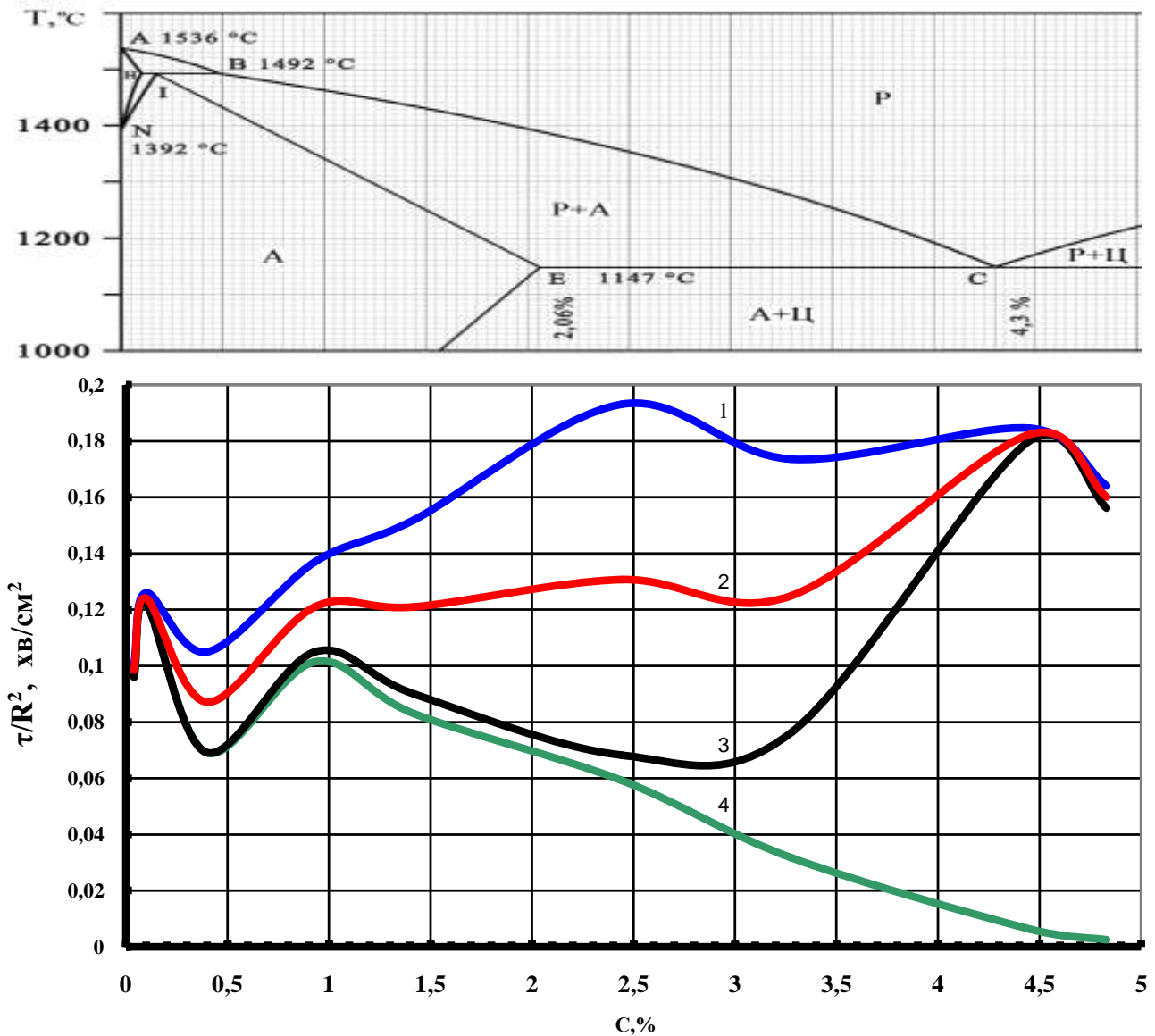


Рис. 9 – Вплив вмісту вуглецю на критерій  $\tau/R^2$  у циліндричних виливках з Fe-C сплавів, які охолоджуються в кокiлi:

1 – межа солідус при  $x/R = 1$ ; 2 – тривалість ЕШО; 3 – межа виливання при  $x/R = 1$ ; 4 – межа ліквідус при  $x/R = 1$

За гіпотезою приведеної товщини, запропонованою М.І. Хворіновим, встановлено вплив вмісту вуглецю у виливках пласкої і кульової форм на критерій  $\tau/R^2$  при  $x/R = 1$ , що дозволило розрахувати тривалість ЕШО наливу, твердіння 100% твердої фази, ліквідус та виливання.

Виведено формули для розрахунку тривалості перебування Fe-C сплавів в інтервалі температур ліквідус-солідус, в рідко-твердої і твердо-рідкої зонах циліндричного виливку при  $x/R=1$  і побудовано відповідний графік (рис.10).

Визначені зони з мінімальною і максимальною тривалістю знаходження у твердо-рідкому стані. При збільшенні часу знаходження металу у твердо-рідкому стані збільшується усадкова шпаристість при вмісті 2,4...2,7 % вуглецю. Це можливо пояснити тим, що ширина двофазної зони у виливку залежить також від концентраційного інтервалу твердіння. Чим він ширше або, іншими словами, хімічний склад первинного дендриту відрізняється від

розплаву, що залишився, тим менше змочування і зменшується можливість фільтрації рідкої фази по капілярах дендритів. Так, для сплавів Fe-C з 2,06 %C до 2,60 %C зміна концентраційного ( $\Delta C$ ) інтервалу затвердіння при температурі ліквідус збільшиться з 1,51 % до 1,60%С, а температурний інтервал тверднення  $\Delta t$  зменшиться з 242<sup>0</sup> до 202<sup>0</sup>. Взаємний вплив цих двох чинників – температурного і концентраційного інтервалів твердіння на процеси утворення усадкових дефектів, раніше ніхто не брав до уваги і в літературі не розглядався.

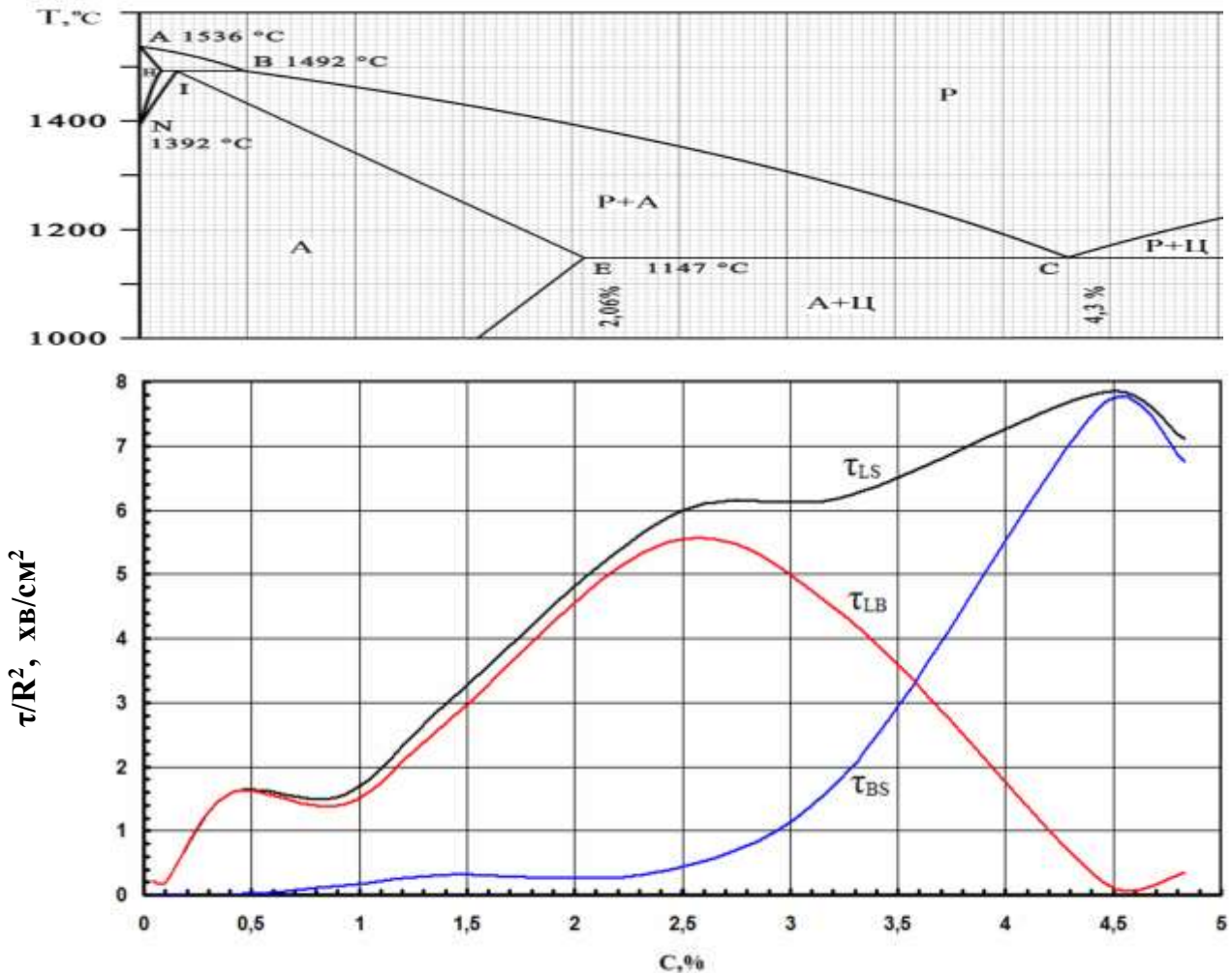


Рис. 10 – Вплив вмісту вуглецю у сплавах Fe-C на критерій  $\tau/R^2$  при твердінні в рідко-твердій ( $\tau_{LB}$ ), твердо-рідкій ( $\tau_{BS}$ ) зонах, в інтервалі температур ліквідус-солідус ( $\tau_{LS}$ ) циліндричних виливків в кокілі

Таким чином, для виконання умов спрямованого тверднення виливків необхідно зміщати несприятливу зону, в якій виникають усадкові дефекти за рахунок коригування хімічного складу інших елементів у заданому інтервалі. Але ці результати потребують подальшого уточнення, оскільки згідно літературним даним зона максимальних усадкових дефектів відповідає значенням різниці температур ліквідус-солідус – 2% С.

Використовуючи розроблені у роботі залежності було розраховано тривалість ЕШО сталевого злитка, що відливається із газодинамічним тиском на метал, який твердіє у формі. Поплавкове влаштування графітованих електродів забезпечує стеження за переміщенням електроду слідом за



опусканням шлакової ванни у надлив (патенти №91943 і №46128). Температура шлакової ванни  $\approx 1550$  °С була достатньою для розплавлення настилів затверділого шару металу у надливі, а металева ванна забезпечила спрямоване твердіння.

Розроблені у роботі залежності порівнювали з відомими методами розрахунків за рівнянням квадратного кореня, за методом Хворінова М.І. і інтегральним тепловим балансом Вейника А.І. (рис. 11).

Для розрахунків за рівнянням квадратного кореня коефіцієнт твердіння для виливків, які охолоджуються у кокілі, приймали 0,30-0,35  $\text{см/с}^{0,5}$  для діапазону 0...2% С, для чавунних – 0,25-0,30  $\text{см/с}^{0,5}$ , а теплофізичні властивості сплавів – згідно стандартних довідкових даних. За методом А.І. Вейника найкращий збіг з експериментальними температурними вимірами при затвердінні 100% твердої фази мав місце тільки для сталі з 0,3...0,6% С і чавуну з 3,3...3,6% С (див. рис. 11). Розрахунки за

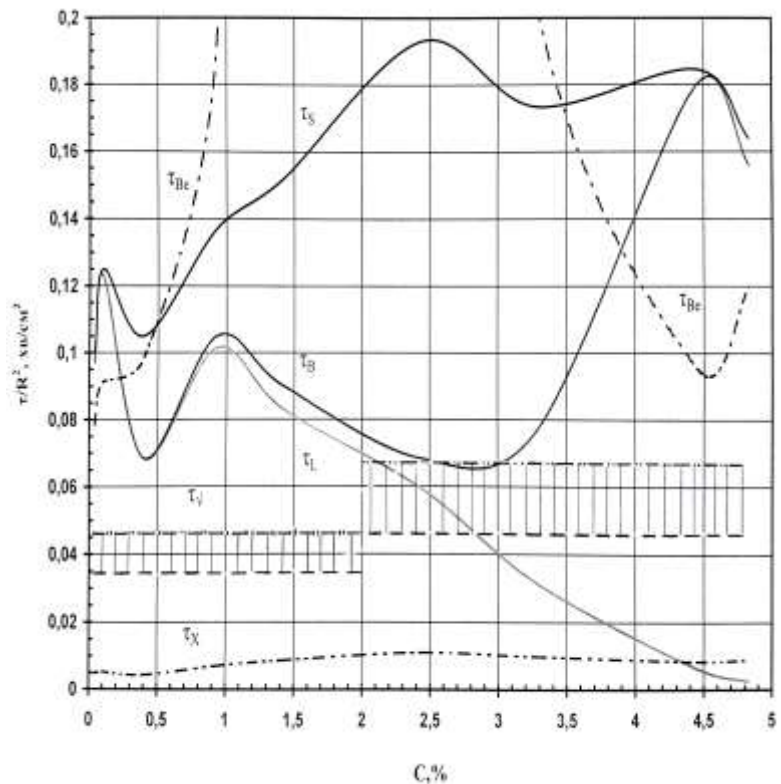


Рис. 11 – Вплив вмісту вуглецю у сплавах Fe-C на критерій  $\tau/R^2$  при твердінні виливків в кокілі за експериментальними даними: 100% твердої фази ( $\tau_s$ ), межі виливання ( $\tau_B$ ), ліквідус ( $\tau_L$ ); та за рівнянням квадратного кореня ( $\tau_v$ ); за формулою М.І. Хворінова ( $\tau_x$ ) і за методом інтегрального теплового балансу А.І. Вейника ( $\tau_{We}$ ) при  $x/R=1$

рівнянням квадратного кореня та методом М.І. Хворінова показали занижені значення порівняно з результатами експериментальних досліджень. Зіставлення з результатами твердіння виливків  $\varnothing 450$  мм, масою 2200 кг з комплексно-легованого ВЧ (мас. %: С-3,10; Si-1,43; Mn-0,58; P-0,194; S-0,010; Cr-0,34; Ni-0,91; Mg<sub>ост</sub>-0,033;), що отримані іншими дослідниками, показало припустиму похибку 10,1% у порівнянні з розробленими залежностями.

Виконані експериментальні і аналітичні дослідження показали, що не можливо врахувати безліч чинників, які впливають на тривалість твердіння: комплексне легування та модифікування сплавів різноманітними хімічними елементами; зміна температури і швидкості заливання розплаву у залежності від маси, товщини стінки і специфічних вимог до фізико-механічних властивостей виливків; наявність усадкової шпаристості в стінці кокілю або нерівномірність набивання формувальної суміші в опоках; нерівномірність швидкості фільтрації розплаву через двофазну твердо-рідку зону; ливарну

форму, що складається з матеріалів з різними теплофізичними властивостями та ін. Тому запропоновано визначати тривалість ЕШО виливків за показником кінетики усадки розплаву у надливі. За відсутності переміщення електроду припиняти ЕШО (рис. 12). Реєстрація та накопичення експериментальних даних про об'ємну усадку різних сплавів дозволить точно встановити мінімальний розмір (висоту) надливу для будь яких типорозмірів виливків.

Згідно встановлених залежностей (див. рис. 9) визначено режими ЕШО надливів прокатних валків із заевтектоїдної сталі 150ХНМ. Тривалість першого етапу обігріву з максимальною силою струму і напруги згідно формули (2) склала  $\approx 71$  хв. Значення тривалості твердіння і об'ємна усадка сталі 150ХНМ у піщаній формі відсутні. Тому загальну тривалість ЕШО встановлювали експериментально за часом припинення переміщення електроду у надлив. Промислові випробування технологічних режимів на ДЗПВ, показали відсутність усадкових дефектів при УЗ контролі, що дозволило освоїти обігріву на  $\approx 2$  год.



б а

Рис. 13 – Торець надливу валка масою 4100 кг зі сталі 150ХНМ після ЕШО (а) і валка (б), відлитого з утепленням екзотермічною сумішшю і дворазовою доливкою надливу розплавом

чавунного прокатного валка також показано прискорення просування фронту тверднення при наближенні до центру виливка (2 на рис. 14), яке відбувається незважаючи на безперервне зменшення тепловідведення у ливарну форму і зменшення швидкості охолодження сплаву в інтервалі температур ліквідус-солідус (1 на рис. 14) у зв'язку з прогрівом форми.

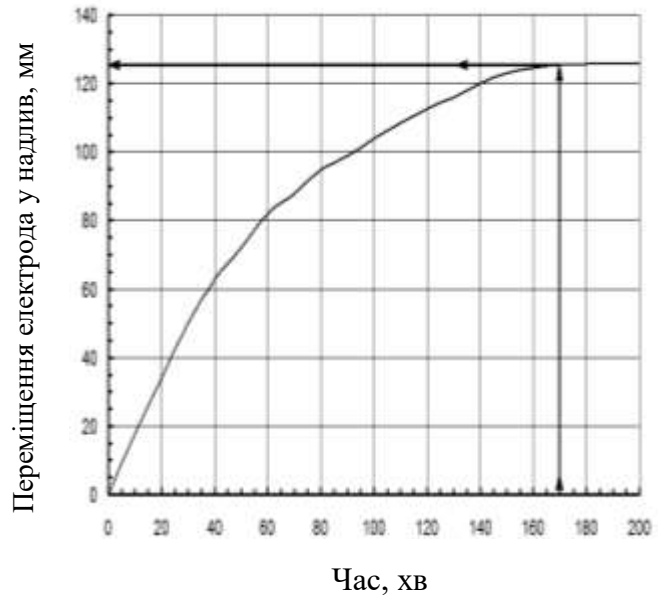


Рис. 12 – Кінетика об'ємної усадки у надливі

нову продукцію і зменшити тривалість

**У п'ятому розділі** викладені теоретичні положення процесу тверднення центральних зон виливків пласкої, циліндричної та кульової форми. Для пласких виливків відомі розрахунки процесів твердіння за рівнянням квадратного кореня та моделювання теплових процесів твердіння в програмному пакеті LVMFlow, що вказують на неможливість прискорення затвердіння центральної зони, але це не відповідає результатам експериментальних досліджень, проведеними різними авторами. На прикладі твердіння

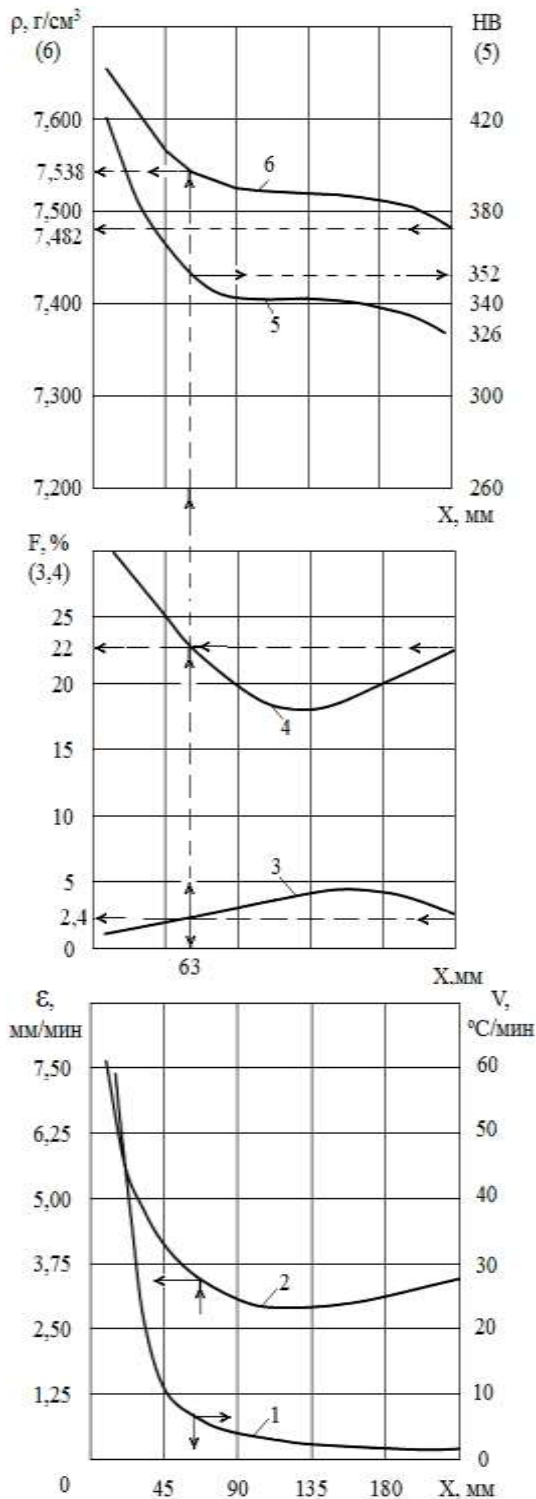


Рис. 14 – Швидкість охолодження (1) в інтервалі температур  $t_L$ - $t_s$ , рух фронту ізосолідус (2), зміна площі графіту (3) і цементиту (4), твердості (5) і густини (6) у виливку  $\varnothing 450$  мм із високоміцного чавуну

Крім того, на глибині 63 мм і у центрі виливку швидкість просування фронту ізосолідус дорівнює  $\approx 3,5$  мм/хв. Якщо зіставити основні показники мікроструктури на цих глибинах, то площа, яку займає графіт (3 на рис. 14), також однакова  $\approx 2,4\%$ , як і цементит  $\approx 22\%$  (4 на рис. 14). Тому швидкість просування фронту твердіння є основним показником формування структури виливку.

Стрілками на рис. 14 позначена схема графічного визначення ділянки виливку на відстані  $\approx 63$  мм від литої поверхні з однаковою площею цементиту і графіту в осьовій зоні ( $X = 225$  мм) і їх густину  $\rho = 7,538$   $\text{г/см}^3$  і  $\rho = 7,482$   $\text{г/см}^3$  відповідно (5 на рис. 14).

Сірчані відбитки з поперечного перерізу бочки прокатного валка  $\varnothing 450$ мм з вибіленого чавуну з пластинчастою формою графіту і включеннями MnS підтверджують прискорене просування фронту твердіння і подрібнення неметалевих включень у поверхневій зоні виливку до глибини 25-30 мм і в осьовій зоні (рис. 15).

Пояснити відбіл в осьовій зоні ліквідацією карбідоутворювальних хімічних елементів (Mn, Cr, Mo, V та ін.) не можливо, оскільки раніше встановлено, що при твердінні чавунних прокатних валків у кокільній частині форми макроліквідація практично відсутня. Це обумовлено тим, що швидкість просування фронту твердіння більше швидкості ліквідації хімічних елементів.

Тому у роботі запропоновано гіпотезу процесу прискореного твердіння центральних зон плоских, циліндричних та кульових виливків з різних сплавів за гетерогенним механізмом: при звуженні фронту затвердіння гілки дендритів є додатковими центрами кристалізації (рис. 16 а,б).



Встановлені залежності зміни кількості гілок дендритів при твердінні сплаву від поверхні вилівка до центру відносно спочатку поверхні фронту твердіння, а потім відносно об'єму рідкого металу, що залишився. Основні формули процесу кристалізації центральної (осьової) зони виливків кульової, циліндричної і плоскої форм зведені у табл. 3.

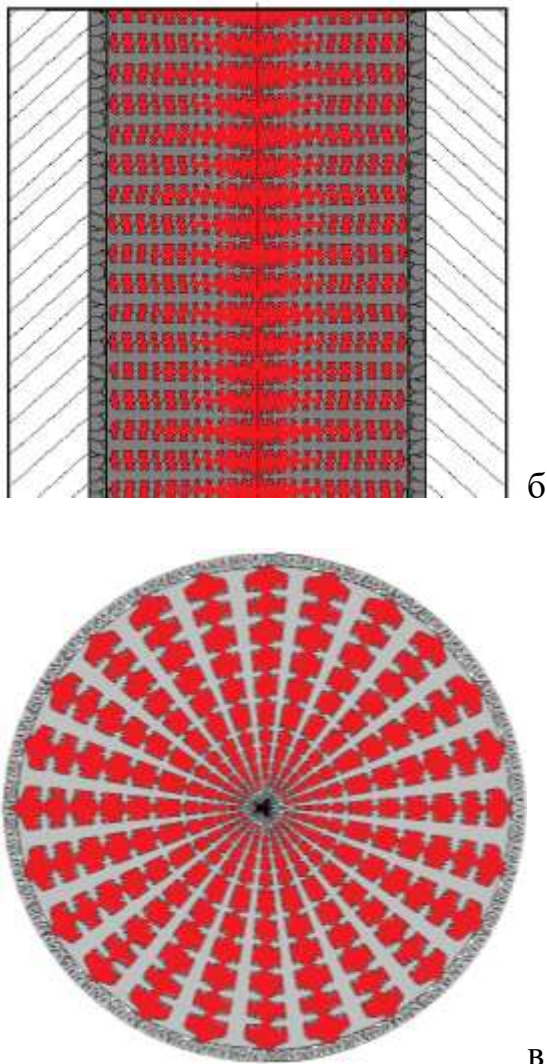


Рис. 16 – Схема гетерогенного механізму твердіння центральної зони вилівка плоскої (а), циліндричної і кульової (б) форми з центрами кристалізації – дендритами твердої фази



Рис. 15 – Сірчаний відбиток з бочки Ø450 мм відбіленого чавуну з включеннями MnS

Аналіз результатів показав, що умові прискореного затвердіння центральних зон виливків ( $r/R=0$ ) відповідають тільки формули, що отримані для розрахунку кількості центрів кристалізації на одиницю об'єму ( $K_V$ ) не затверділої частини вилівку (рис. 17).

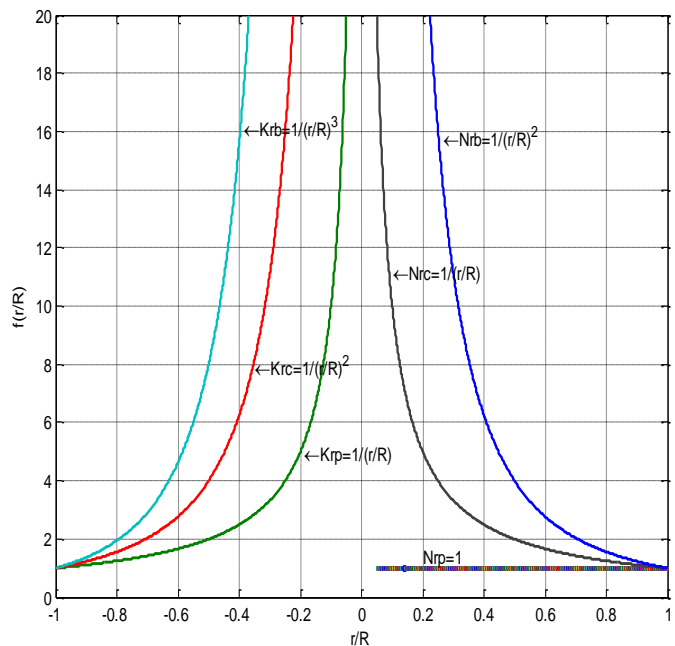


Рис. 17 – Вплив положення фронту затвердіння по глибині виливків на зміну кількості центрів кристалізації на одиницю об'єму ( $K_V$ ) і поверхні ( $N_V$ ) сплаву, що твердіє:  $R$  – радіус (половина товщини) вилівка;  $r$  – не затверділа частина металу;  $r/R=0$  – осьова зона;  $r/R=1$ ,  $r/R=-1$  – зовнішня поверхня виливків; індекси:  $p$  – пластина;  $z$  – циліндр;  $b$  – куля;  $N_R=1$ ,  $K_R=1$  на поверхні виливків



Таблиця 3 – Формули для розрахунку кількості центрів кристалізації при зменшенні товщини не затверділого шару металу ( $r$ ) на одиницю об'єму і поверхні виливків різних форм

Конфігурація вилівка	Кількість центрів кристалізації при зміні товщини не затверділого шару металу вилівка від $R$ до $r$	
	на одиницю об'єму фронту твердіння, $Kr$	на одиницю поверхні фронту твердіння, $Nr$
Пласка напівнескінчена	$K_{rp} = K_{RP} \frac{R}{r}$	$N_{rp} = N_{RP}$
Циліндр	$K_{rc} = K_{RC} \frac{R^2}{r^2}$	$N_{rc} = N_{RC} \frac{R}{r}$
Куля	$K_{rb} = K_{Rb} \frac{R^3}{r^3}$	$N_{rb} = N_{Rb} \frac{R^2}{r^2}$

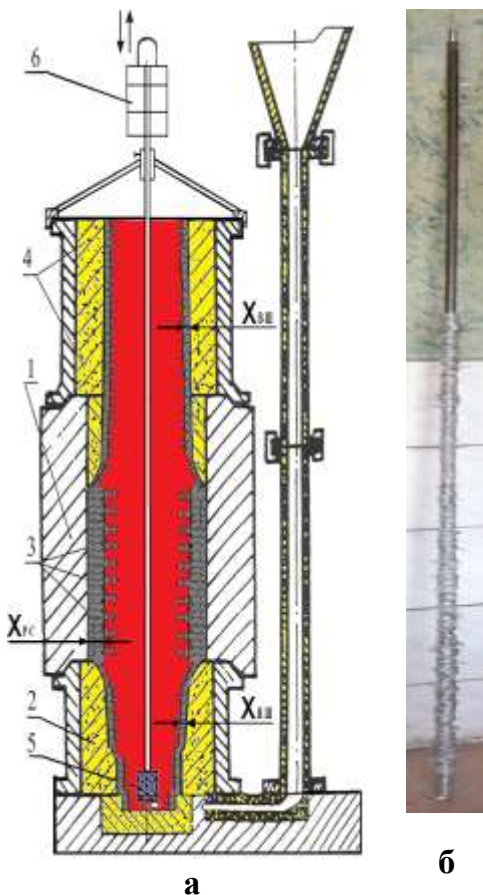


Рис. 18 – Схема ливарної форми з пристроєм для введення модифікатору (а) та загальний вигляд сталевго прута з Al дротом масою 0,587кг (б):  $X_{P-3}$  – товщина робочого шару чавуну у кокілі;  $X_{H-ш}$ ,  $X_{B-ш}$  – товщина затверділого шару металу у піщаних шийках

Таким чином, затвердіння центральних зон виливків пласкої форми здійснюється за гетерогенним механізмом за умови, що фронт затвердіння ліквідус досяг центру вилівку. В цей час розплав вже містить тверду фазу, а гілки дендритів є додатковими центрами кристалізації. Тому в осьовій зоні валків неминуче утворення цементиту, підвищена кількість якого може привести до зламування при експлуатації на стані.

Для зменшення кількості цементиту в осередді валків раніше була апробована технологія введення в осьову зону легкоплавкого графітізуючого модифікатора (алюмінію). Експериментальні дослідження (О.Ю. Хітько) показали зменшення кількості цементиту на 10% і усунення транскристалічності структури у порівнянні з контрольним валком. Кількість алюмінію повинна бути обмежена 0,1%, оскільки його збільшення призводить до утворення газової шпаристості. Однак дослідження не були продовжені для різних типорозмірів валків через відсутність даних про об'єм рідкого металу на момент затвердіння робочого шару у бочці, що не дало можливість розрахувати необхідну мінімальну кількість модифікатора.

За результатами роботи, що наведені у розділі 3 кінетичних кривих твердіння в кокільних і піщаних формах у критеріях  $\tau/R^2$  і  $x/R$ , нами виконано (рис. 18) розрахунок часу і

кількості модифікатора для прокатного валка виконання СПХН-65 масою 1115кг.

По-перше було визначено тривалість ( $\tau_{p-c}$ ) затвердіння чавуну у робочому шарі бочки ( $X_{p-c}$  на рис. 18). За даними тривалості твердіння робочого шару розраховували товщину шару металу, який на цей час затвердів у нижній шийці ( $X_{н-ш}$ ), потім у верхній шийці і надливі ( $X_{в-ш}$ ). Це дозволило розрахувати об'єм рідкого металу в осьовій зоні валка на момент закінчення затвердіння робочого шару і встановити масу модифікатора, необхідного для графітизації осьової зони. Крім того, для встановлення можливості введення пристрою (5 на рис. 17) з модифікатором в осьову зону бочки валка необхідно також розрахувати глибину досягнення фронту виливання у цей момент часу.

Основним видом браку валків з литими калібрами є кільцеві гарячі тріщини на виступі калібру (рис. 19а). Зародження гарячої тріщини відбувається у твердо-рідкій частині з меншою товщиною затверділого металу у порівнянні з плоскими частинами виливка (рис. 19б). Причиною цього є менший тепловідвід через виступаючу частину ливарної форми. Для попередження виникнення гарячих тріщин запропоновано використовувати поверхневе внутрішньоформене модифікування ультрадисперсними тугоплавкими сполуками (УДС) карбідом кремнію SiC і карбонітридом титану TiCN з розміром частинок 0,01-0,1 мкм у вигляді пасти або припили.

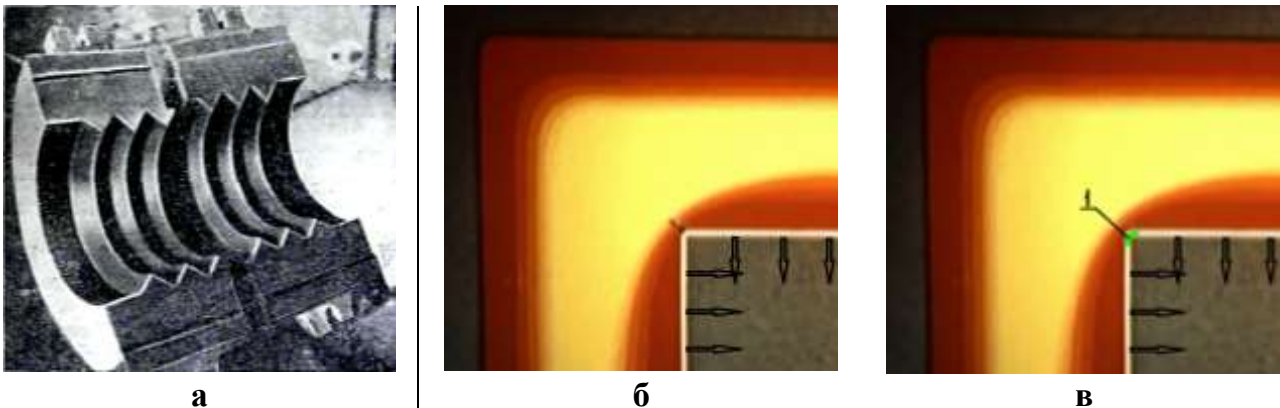


Рис. 19 – Кокіль для виробництва валків з литими калібрами (а), схема утворення гарячої тріщини (б) і ділянка на виступаючій частині ливарної форми з модифікатором (в): 1 – паста або припил модифікатора з УДС; стрілками вказано тепловий потік від металу, що твердіє, і утруднене тепловідведення через виступаючу частину форми

Незважаючи на меншу товщину затверділого шару металу біля виступаючої частини ливарної форми, використання УДС (1 на рис. 19б), забезпечить подрібнення мікроструктури металу та підвищить міцність у порівнянні з ділянкою виливку, яка затверділа на плоскій поверхні і має більшу товщину.

У додатках наведено акти впровадження розроблених технологічних процесів у вальцеливарному цеху АТ "ДЗПВ", акт впровадження результатів роботи в учбовому процесі кафедри ливарного виробництва НМетАУ і розрахунок потенційного економічного ефекту у сумі 639 тис. грн.

## ВИСНОВКИ

У дисертації запропоновано нове рішення науково-технічної проблеми спрямованого твердіння масивних виливків з Fe-C сплавів, отримане теоретичне обґрунтування процесів утворення усадкових раковин, шпаристості у твердо-рідкій зоні вилівка та розроблено засоби їх попередження, які дозволили зменшити непродуктивні втрати металу на надливи, затрати на електроенергію, підвищити якість виливків і злитків.

1. Експериментально встановлено кінетику об'ємної усадки прокатних валків з високоміцного чавуну масою 3,6 т з різними розмірами бочки: діаметр першого у 1,31 раз більший, ніж у другого, а висота менша у 0,52 рази. Визначено, що при охолодженні у комбінованій кокільно-піщаній формі об'ємна усадка валка з меншим діаметром складає 2,4%, що обумовлено прискореним твердінням бочки ( $\tau_{S-B} = 112$  хв) у порівнянні з нижньою шийкою ( $\tau_{S-НШ} = 198$  хв) і передчасним припиненням живлення усадки з надливу. Об'ємна усадка валка з більшим діаметром бочки в 1,5 рази вище – 3,5%, у зв'язку з спрямованим твердінням нижньої шийки ( $\tau_{S-НШ} = 179$  хв) і бочки ( $\tau_{S-B} = 193$  хв).

2. Встановлено, що максимальна усадка відбувається у процесі переміщення межі виливання від кокілю в осьову зону. У валка з більшим діаметром бочки 77,5% рідкого чавуну перейшло з надливу при  $\tau_{вил} = 78$  хв, а у валка з меншим діаметром – 89% при  $\tau_{вил} = 45$  хв. Невеликий вплив на кінетику усадки процесу тверднення шийок пояснюється низькою теплоакумулюючою здатністю піщано-глинистої форми у порівнянні з кокілем і малою товщиною затверділого шару металу за цей час.

3. Експериментально встановлено об'ємну усадку прокатних валків з високоміцного чавуну масою: 8,86 т – 4,1% (363 кг), 14,12 т – 2,6% (369 кг) і 17,22 т – 3,9% (668 кг). Визначено, що максимальна усадка 76-99% відбувається при кристалізації рідко-твердої частини бочки і шийок. Температура шлакової і металеві ванни у надливі 1555...1520 °С забезпечила переміщення розплаву і живлення усадки робочого шару бочки та значної частини нижньої шийки, але не затримала твердіння верхньої шийки валків.

4. Відповідно до вимог теорії ливарних процесів тривалість твердіння надливу повинна дорівнювати або бути вище тривалості твердіння вилівка, але в роботі обґрунтована необхідність припинення живлення усадки раніше – при досягненні сплавом межі живлення, коли припиняється фільтрація розплаву через центр вилівка. На сучасному рівні розвитку науки встановити точно межу живлення неможливо, тому запропоновано момент відключення ЕШО надливу ( $\tau_{ЕШО}$ ) приймати рівним середньому значенню часу досягнення межі виливання і солідус центру верхньої шийки за експериментальними даними за формулою  $\tau_{ЕШО} = 0,996 \cdot 10^{-3} \cdot D^2_{II}$ . Нові режими для кожного окремого типорозміру прокатного валка скоротили тривалість обігріву в 1,5-2,5 рази у порівнянні з тривалістю ЕШО, що діяла раніше, 5 годин для валків масою <10 т та 7 годин – для валків  $\geq 10$  т, і впроваджені на АТ «ДЗПВ» (акт від 01.12.2015 р).

5. Встановлено, що перший етап обігріву, який супроводжується максимальною усадкою розплаву з надливу, необхідно проводити з найвищою витратою електроенергії ( $I \approx 1300 \dots 1600 \text{ А}$ ,  $U \approx 45 \dots 50 \text{ В}$ ) на протязі затвердіння рідко-твердої фази бочки валка. За критерієм Б.Б. Гуляєва тривалість першого етапу становить  $\tau = 0,17 \cdot 10^{-3} \cdot D_B^2$  при охолодженні бочки у кокілі з ливарною фарбою і  $\tau = 0,204 \cdot 10^{-3} \cdot D_B^2$  – у кокілі з теплоізоляційним покриттям. Зменшення тривалості обігріву надливу з найвищою витратою електроенергії забезпечило зниження витрати електроенергії і термічних напружень по висоті вилівка, зменшення витрат графітованих електродів і флюсів, збільшення оборотності кокільного і опочного оснащення (пропозиції внесені у технологічну інструкцію ТИ-00187375-Л-91-2017 і впроваджені на АТ «ДЗПВ»).

6. Визначені особливості процесу твердіння і умови відсутності усадкових дефектів у прокатних валках нового типу з конічними шийками, циліндричними трефами і діаметром бочки в 2 рази більшим, ніж трефи. Запропоновано ступінчастий режим ЕШО надливу, який зменшив тривалість обігріву з 5 год до 112 хв (у 2,7 рази), кількість і розмір усадкових дефектів. Рекомендації апробовані і впроваджені у виробництво.

7. Встановлені умови спрямованого твердіння і відсутності усадкових дефектів у нижніх шийках прокатних валків. Дефекти відсутні, якщо час припинення живлення усадки бочки валка  $\tau_{Б-Ж}$  більше або дорівнює тривалості припинення живлення усадки нижньої шийки  $\tau_{НШ-Ж}$ . За критерієм Б.Б. Гуляєва  $\tau/R^2$  для бочки валка, що охолоджується у кокілі з ливарною фарбою, розраховано співвідношення  $D_{БФ} \geq 1,83 D_{НШ}$ , а у кокілі з теплоізоляційним покриттям  $D_{БТ} \geq 1,67 D_{НШ}$ .

8. Моделювання впливу конструкції ливарної форми нижньої шийки з метою запобігання утворенню усадкових дефектів дозволило встановити, що зовнішній кільцевий чавунний холодильник оптимальною товщиною  $\approx 20 \text{ мм}$  забезпечує прискорене твердіння металу нижньої шийки у порівнянні з бочкою. Тепло, що акумулюється, холодильник відводить не в довкілля, а у формувальну суміш з низькою теплопровідністю, а ступінчастий режим обігріву сприяє спрямованому твердінню бочки і верхньої шийки.

9. Досліджено вплив електродугового-електрошлакового обігріву на зміну хімічного складу флюсів АН-60 і АН-1 в шлаковій ванні і температуру їх фазових перетворень. Встановлено збільшення вмісту сірки у  $\approx 33$  рази (з 0,022% до 0,720%) через 60 хв обігріву; через 120 хв – у  $\approx 41$  раз (до 0,910%); через 180 хв – у  $\approx 38$  разів (до 0,830%). Це накладає обмеження на повторне використання флюсу при ЕШО прокатних валків з кулястою формою графіту, в яких підвищення вмісту сірки у розплаві більше 0,01% приводить до демодифікування.

10. Виконано теоретичне узагальнення дев'яти експериментальних температурних вимірів процесу твердіння вилівок із Fe-C сплавів у циліндричному кокілі з вмістом вуглецю 0,04%, 0,1%, 0,4%, 0,93%, 1,42%, 2,44%, 3,28%, 4,45%, 4,83%, які були отримані Б.Б. Гуляєвим, О.О. Магницьким, Л.М. Постновим та ін. Кінетичні криві було оцифровано і інтерпольовано у діапазоні 0,04...4,83%С, встановлено вплив вмісту вуглецю на критерій  $\tau/R^2$  при

$x/R=1$ , тривалість досягнення межі ліквідус, виливання, солідус центральної частини циліндричного виливка.

11. За гіпотезою приведеної товщини М.І. Хворінова встановлено вплив вмісту вуглецю у виливках пласкої і кульової форм на критерій  $\tau/R^2$  при  $x/R = 1$ , що дозволило розрахувати тривалість ЕШО наливу, твердіння 100% твердої фази, ліквідус та виливання в інтервалі 0,04...4,83%С.

12. Для забезпечення умов спрямованого твердіння виведені формули і залежності для встановлення тривалості режимів електродугового-електрошлакового обігріву надливу виливків і злитків з Fe-C сплавів циліндричної, пласкої і кульової форми, що твердіють у кокілі. Тривалість ЕШО виливків приймали як середнє значення між тривалістю твердіння межі солідус і виливання. Скорочення тривалості обігріву надливу зменшить перепад температур по висоті виливка і рівень залишкових ливарних напружень, знизить витрати електроенергії і підвищить оборотність кокільно-опочного оснащення

13. Встановлено вплив вмісту вуглецю на критерій  $\tau/R^2$  при твердінні в кокілі циліндричних, пласких і кульових виливків в рідко-твердій, твердо-рідкій зонах і в інтервалі температур ліквідус-солідус. Визначені зони з максимальною тривалістю знаходження у твердо-рідкому стані при  $x/R = 1$ , в яких утворюється усадкова шпаристість. Отримані результати дозволяють корегувати вміст хімічних елементів в сплаві у заданому інтервалі для зменшення усадкової шпаристості.

14. Розроблені залежності впливу вмісту вуглецю у сплавах Fe-C на критерій  $\tau/R^2$  порівнювали з відомими методами розрахунків по рівнянню квадратного кореня, за методом Н.І. Хворінова і інтегральним тепловим балансом А.І. Вейника. За методом А.І. Вейника найкращий збіг з експериментальними температурними вимірами при затвердінні 100% твердої фази мав місце тільки для сталі з 0,3...0,6% С і чавуну з 3,3...3,6% С, розрахунки по рівнянню квадратного кореня та за методом Н.І. Хворінова показали занижені значення, а зіставлення з експериментальними дослідженнями твердіння виливків Ø450 мм з високоміцного комплекснолегованого чавуну масою 2200 кг у кокілі показало припустиму похибку розрахунків 10,1%.

15. Теоретично визначено та експериментально перевірено закономірності тривалості обігріву надливу по кінетиці усадки комплекснолегованих і модифікованих сплавів з різними температурно-часовими режимами заливання і теплофізичними властивостями ливарної форми, за якими процес обігріву необхідно припиняти з моменту закінчення переміщення електродів у надлив. Прийнято к розробленню та впровадженню у ВЛЦ АТ «ДЗПВ», акт від 20.03.2017 р.

16. Встановлено тривалість електродугового-електрошлакового обігріву надливу прокатних валків із заевтектоїдної сталі 150ХНМ та вплив комбінованої кокільно-піщаної форми на об'ємну усадку. Тривалість першого етапу обігріву з максимальною силою струму і напруги розраховували за критерієм  $\tau/R^2$  для сплаву з 1,5%С. Загальну тривалість ЕШО встановлювали експериментально за часом припинення переміщення електроду у надлив, що

обумовлено відсутністю даних про тривалість твердіння і об'ємну усадку сталі 150ХНМ. Результати промислових випробувань і рекомендованих технологічних режимів успішно випробувані і впроваджені у вальцеливарному цеху "ДЗПВ", що дозволило освоїти нову продукцію і зменшити тривалість обігріву на 2 год.

17. Визначено час електрошлакового обігріву сталевого злитка, який отримують з газодинамічним впливом на рідкий метал, що кристалізується. Поплавковий пристрій забезпечує стеження за зміною рівня розплаву і здійснює переміщення електроду слідом за опусканням шлакової ванни, а припинення усадки свідчить про закінчення обігріву.

18. Запропоновано гіпотезу процесу прискореного твердіння центральних зон виливків пласкої, циліндричної і кулястої форм по гетерогенному механізму, при якому гілки дендритів є додатковими центрами кристалізації. Виведені аналітичні залежності показали, що умові прискореного твердіння центральних зон виливків відповідають тільки результати, що отримані для розрахунку кількості центрів кристалізації на одиницю об'єму незатверділої частини виливка. Розроблені положення можливо використовувати з метою отримання заданих фізико-механічних властивостей, макро- і мікроструктур центральних зон масивних виливків.

19. З метою зменшення кількості цементиту і транскристалічності структури в осьовій зоні чавунних прокатних валків розроблена методика розрахунку маси графітуючого модифікатора і часу його введення в рідку серцевину після твердіння робочого шару чавуну заданої товщини. Масу модифікатора, що вводиться, встановлювали за критерієм  $\tau/R^2$  з урахуванням об'єму рідкого чавуну, що залишився після затвердіння необхідного робочого шару металу у бочки, а також нижній та верхній шийках. Отримані залежності і формули можливо використовувати для розрахунку різних типорозмірів чавунних валків.

20. Для попередження виникнення гарячих тріщин, зародження яких відбувається у твердо-рідкій зоні виливку, запропоновано створювати дрібнозернисту макроструктуру сплаву шляхом нанесення ультрадисперсних модифікаторів SiC і TiCN у вигляді пасти або припили тільки на поверхневий шар форми, увігнутому всередину виливка. Незважаючи на меншу товщину затверділого металу у виступаючої частині ливарної форми, дрібнозерниста макроструктура матиме більшу міцність у порівнянні з ділянкою виливку, який затвердів на пласкій поверхні і має більшу товщину.

21. Результати експериментальних та теоретичних досліджень апробовано і впроваджено на АТ "ДЗПВ" і в учбовому процесі Національної металургійної академії України. Нові режими ЕШО дозволили скоротили тривалість обігріву в 1,5-2,5 рази для кожного окремого типорозміру прокатного валка у порівнянні з тривалістю ЕШО, що діяла раніше, 5 годин для валків масою <10 т та 7 годин – для валків  $\geq 10$  т. Потенційний економічний ефект у сумі 639 тис. грн. розраховано при роботі стаціонарної і мобільної установок ЕШО у вальцеливарному цеху ДЗПВ.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ ВИКЛАДЕНО У ПУБЛІКАЦІЯХ:

*Статті у виданнях, що включені до міжнародних науково-метричних баз (Scopus):*

1. **Menyailo E. V.** Shrinkage Defects Elimination Methods in the Bottom Necks of Cast Iron Rolls // Metallurgical and Mining Industry, 2010, Vol. 2, No. 6. p. 397–400 (Scopus) – фахове.

2. Kalinin V. T., Khrychikov V. E., Krivosheev V. A., **Menyailo E. V.** Theory and Practice of Cast-Iron Inoculation by Ultra - and Nanodispersed Materials // Metallurgical and Mining Industry, 2010, Vol. 2, No. 5. p. 341–347 (Scopus) – фахове.

3. Khrychikov V. E., **Menyailo E. V.** // Temperature Patterns and Pouring Limits of High-Strength Cast Iron during Solidification in the Combined Chill-Sandy Mold Box // Metallurgical and Mining Industry, 2011, Vol. 3, No. 2. p. 39–43 (Scopus) – фахове.

4. **E.V. Menyailo** /Ph.D. (Eng.)/, V.E. Khrychikov /D.Sc. (Eng.)/, T.V. Semenova /Ph.D. (Econ.)/, Yu. A. Mushenkov /Ph.D. (Phys.&Math.)/, S.V. Menyailo. The Features of Using Recycled Material Scrap in Manufacture of High-Strength Cast-Iron Castings // Metallurgical and Mining Industry, 2009. No. 1. p. 25–28 (Scopus) – фахове.

*Статті у наукових фахових виданнях України:*

5. **Меняйло Е.В.** Объемная усадка массивных отливок из высокопрочного чугуна / Меняйло Е.В., Пройдак Ю.С., Хрычиков В.Е. // Процессы литья. №3.– 2018.– ФТИМС НАН Украины.– С. 9–13.

6. **Меняйло Е.В.** Теплофизическая модель ускоренного затвердевания центральных зон отливки // Процессы литья. ФТИМС НАН Украины.– 2012.– №6.– с.14–21.

7. **Меняйло Е.В.** Критерии оценки формирования усадочной раковины и пористости в нижней шейке чугунного прокатного валка // Теория и практика металлургии.– 2010.– №5–6.– С. 91–94.

8. **Меняйло Е.В.** Особенности процесса затвердевания чугунных прокатных валков соотношением диаметров бочки и шеек более двух // Металлургическая и горнорудная промышленность.– 2011.– № 6. – С. 22–25 (Index Copernicus).

9. **Меняйло Е.В.** Методы устранения усадочных дефектов в нижних шейках чугунных прокатных валков // Металлургическая и горнорудная промышленность.– 2010.– №6.– С. 44–46 (Index Copernicus).

10. **Меняйло Е.В.** Особенности использования лома возврата при производстве отливок из высокопрочного чугуна / Меняйло Е.В., Хрычиков В.Е., Семенова Т.В., Меняйло С.В., Мушенков Ю.А. // Металлургическая и горнорудная промышленность.– 2009.– № 6.– С. 47–49 (Index Copernicus).

11. **Меняйло Е.В.** Физическая модель процесса кристаллизации осевой зоны отливок шаровой, цилиндрической и плоской форм // Металлургическая и горнорудная промышленность.– 2013.– №4. – С. 36–39 (Index Copernicus).

12. **Меняйло Е.В.** Влияние макроструктуры сплавов на их прочность и пластические свойства / Меняйло Е.В., Пройдак Ю.С., Репях С.И., Хрычиков В.Е. // Металлургическая и горнорудная промышленность.– 2014.– №4.– С. 22–27 (Index Copernicus).

13. **Меняйло Е.В.** Инженерная методика расчета рациональной продолжительности обогрева прибылей чугунных прокатных валков //



Металлургическая и горнорудная промышленность.– 2014.– №5.– С. 17–21 (Index Copernicus).

14. **Меняйло Е.В.** Определение продолжительности питания из прибыли усадки массивных отливок // *Металл и литье Украины.*–2017.–№2–3.– С. 23–26.

15. Влас М.И. Модифицирование износостойких чугунов ультра- и нанодисперсными материалами / Влас М.И., Калинин В.Т., Хрычиков В.Е., Кривошеев В.А., **Меняйло Е.В.** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. –Випуск №1(66). – Дніпропетровськ, 2010. С. 170–180.

16. Калинин В.Т. Теория и практика модифицирования чугуна ультра- и нанодисперсными материалами / Калинин В.Т., Хрычиков В.Е., Кривошеев В.А., **Меняйло Е.В.** // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2010. – № 5. – С. 41–45 (Index Copernicus).

17. Хрычиков В.Е. Оценка методов снижения расхода металла на прибыли отливок / Хрычиков В.Е., **Меняйло Е.В.**, Семенова Т.В., Мушенков Ю.А. // *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії.*– 2010. – №3(20). – С. 278–281.

18. Хрычиков В.Е. Влияние комбинированной кокильной и песчано-глинистой литейных форм на положение границы выливания высокопрочного чугуна / Хрычиков В.Е., **Меняйло Е.В.** // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2011. – № 1. – С. 27–30 (Index Copernicus).

19. Хрычиков В.Е. Температурные поля и границы выливания при затвердевании высокопрочного чугуна в комбинированной кокильно-песчаной литейной форме / Хрычиков В.Е., **Меняйло Е.В.** // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2011. – № 2. – С. 45–48 (Index Copernicus).

20. Хрычиков В.Е. Адаптация модели LVMFLOV к процессу затвердевания чугуна прокатного валка / Хрычиков В.Е., Белый А.П., **Меняйло Е.В.**, Маркелова Д.В. // *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії.* –2011, №4. – с. 160–163.

21. Хрычиков В.Е. Особенности образования усадочной пористости в бочке чугуна прокатного валка / Хрычиков В.Е., **Меняйло Е.В.**, Мушенков Ю.А. Якимова Д.В.// *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2012. –№6. –С. 13-16 (Index Copernicus).

22. Репях С.И. К вопросу образования горячих трещин в литых изделиях и сварных швах / Репях С.И., **Меняйло Е.В.**, Пройдак Ю.С., Хрычиков В.Е. // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2014. –№3. –С. 37–41 (Index Copernicus).

23. Кривошеев В.А.. Комплексная технология получения качественных отливок машиностроительного и металлургического назначения/ Кривошеев В.А., Калинин В.Т., **Меняйло Е.В.**, Селиверстов В.Ю., Доценко Ю.В., Мусиенко И.О., Фролов Э.А. // *Процессы литья.* –2019. –№2. с 65-71.

*Статті у закордонних виданнях:*

24. **Меняйло Е.В.** К расчету продолжительности питания усадки отливок из высокопрочного чугуна / **Меняйло Е.В.**, Пройдак Ю.С., Хрычиков В.Е. // *Литейное производство.* – №2. – 2016. – с. 18–19.



*Статті у виданнях, що не входять до переліку фахових:*

25. **Меняйло Е.В.** Инженерная методика расчета продолжительности питания усадки чугуновых прокатных валков // Процессы и технологии литья. – Коллективная монография – 2015. – С. 106–135.

26. **Меняйло Е.В.** Исследование процесса перемещения расплава из прибыли для питания усадки отливки // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2016. – №1. – с. 48–53 (Index Copernicus).

27. **Меняйло Е.В.** Расчет рациональной продолжительности комбинированного электродугового-электрошлакового обогрева прибыли прокатного валка из заэвтектоидной стали 150ХНМ / Меняйло Е.В., Пройдак Ю.С., Хрычиков В.Е. // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2016. – №5. – С. 40–42 (Index Copernicus).

28. Кривошеев В.А. Технологические особенности производства отливок металлургического назначения повышенной эксплуатационной стойкости использованием рафинированного доменного чугуна и наномодификаторов / Калинин В.Т., **Меняйло Е.В.**, Хрычиков В.Е. // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2017. – №3. – С. 37–42 (Index Copernicus).

29. Меняйло Е.В. Влияние процессов затвердевания центральной зоны отливки на формирование усадочной пористости / Меняйло Е.В., Пройдак Ю.С., Хрычиков В.Е. // Теплотехника, энергетика и экология в металлургии. Коллективная монография. – Днепр. – 2017. – С. 232–235.

30. Хрычиков В.Е. Влияние регулируемого охлаждения в литейной форме на остаточные напряжения в сортопрокатных валках из отбеленного чугуна / Хрычиков В.Е., Белый А.П., Иванова Л.Х., Осипенко И.А., Меняйло Е.В. // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2017. – №2. – С. 28–30 (Index Copernicus).

31. Хрычиков В.Е. Влияние процессов затвердевания на распределение сульфидов магния и макроструктуру отливок из высокопрочного чугуна / Хрычиков В.Е. Меняйло Е.В., Семенов А.Д. // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2018. – № 1. – С. 18–27 (Index Copernicus).

Патенти України на винахід:

32. Патент України на корисну модель № 46128 U 2009 06107. Спосіб отримання виливків // Селівьорстов В.Ю., Хричиков В.Є., Куцова В.З., **Меняйло О.В.**, Савега Д.О. Заявл. 10.12.2009, опубл. 10.12.2009. Бюл. № 23, 2009 р.

33. Патент України на корисну модель № 91943 U 2009 06145. Пристрій для одержання виливків // Селівьорстов В.Ю., Хричиков В.Є., Куцова В.З., **Меняйло О.В.** Заявл. 15.06.2009, опубл. 10.09.2010. Бюл. № 17, 2010 р.

34. Патент України на винахід №113331 Спосіб лиття прокатних валків // Хричиков В.Є., Білий О.П., **Меняйло О.В.**, Иванова Л.Х., Осипенко І.О. Заявл. №а201503784 від 21.04.2016; опубл. 10.01.2017, Бюл. № 1.

Тези доповідей:

35. Пройдак Ю.С. Затвердевание прибыли и питание усадки отливок из чугуна с шаровидной формой графита / Пройдак Ю.С., **Меняйло Е.В.**, Хрычиков В.Е. // A collective monograph edited by Jarosiaw Borysa, Rafal

Wyczolkowski. Series: Monografie Nr 56. XVII International Scientific Conference New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering. –2016. – Czestochowa. – С. 166–169.

36. Пройдак Ю.С. Температурно-временные режимы питания усадки массивных стальных отливок / Пройдак Ю.С., **Меняйло Е.В.**, Хрычиков В.Е. // A collective monograph edited by Jaroslaw Boryca, Dorota Musiai. Series: Monografie Nr 68. LXVIII International Scientific Conference New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering. –2017. – Czestochowa. – С. 65–69.

37. Хрычиков В.Е. Границы выливания в отливках из высокопрочного чугуна, затвердевающего в кокильно-песчаной форме / Хрычиков В.Е., **Меняйло Е.В.** // Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейном производстве. Материалы II международной научно-технической конф. –Краматорск.– 2009. – С. 188.

38. Хрычиков В.Е. Влияние температуры заливки и теплоты фазового перегрева на затвердевание чугуновых отливок / Хрычиков В.Е., **Меняйло Е.В.** // Материалы VI международной научно-практ. конф. «Литье 2010». – Запорожье.– 2010. – С. 95-97.

39. Хрычиков В.Е. Влияние температуры заливки и скрытой теплоты кристаллизации на затвердевание чугуновых отливок / Хрычиков В.Е., **Меняйло Е.В.** // Материалы VII международной научно-практ. конф. «Литье 2011». – Запорожье.– 17–21 мая 2011.– том 1. – С. 209-210.

40. Хрычиков В.Е. Особенности питания усадки при доливке чугуна в прибыль прокатного валка / Хрычиков В.Е., **Меняйло Е.В.**, Семенова Т.В. // Материалы VIII международной научно-практ. конференции «Литье 2012».– Запорожье.– 22–25 мая 2012.– том 1.– С. 261–263.

41. Хрычиков В.Е. Границы выливания высокопрочного чугуна в комбинированных кокильной и песчано-глинистой формах / Хрычиков В.Е., **Меняйло Е.В.**, Семенова Т.В., Мушенков Ю.А. // Материалы IX международной научно-практ. конф. «Литье 2013». – Запорожье 2013. – том 1. – С. 211-212.

42. Хрычиков В.Е. Особенности изменения изотерм и изохрон при выливании высокопрочного чугуна из кокиля / Хрычиков В.Е., **Меняйло Е.В.**, Щеглова И.С., Колодяжная Л.Ю.//Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейном производстве. Материалы IV международной н-т конф.– Краматорск.– 2013. – С. 233–234.

43. **Меняйло Е.В.** Инженерная методика расчета продолжительности обогрева прибылей чугуновых прокатных валков / Материалы XI международной научно-практ. конф. «Литье 2015». –Запорожье. – 2015.– С.185–186.

44. **Меняйло Е.В.** Инженерная методика расчета продолжительности питания усадки отливок из высокопрочного чугуна / **Меняйло Е.В.**, Пройдак Ю.С., Хрычиков В.Е. // Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейном производстве. Материалы V международной н-т конф.– Краматорск.– 21–25 сентября 2015. – С.123.

45. **Меняйло Е.В.** Формирование структур центральных зон отливок из Fe-C сплавов шаровой, цилиндрической и плоской формы / Материалы XII международной н-т конф. «Литье 2016». – Запорожье. – 2016. – С.151–163.

46. **Меняйло Е.В.** Инженерная методика расчета продолжительности затвердевания двухфазной зоны в отливках из Fe-C сплавов / Новые материалы и технологии в машиностроении. Материалы VIII международной н-т конф. – Киев. – 2016. – С.103–104.

47. Хрычиков В.Е. Исследование результативности питания усадки массивных прокатных валков методом доливки расплава в прибыль / Хрычиков В.Е., **Меняйло Е.В.**, Пройдак Ю.С. // Материалы XIII международной н-т конф. «Литье 2017». – Запорожье. – 23–25 мая 2017. – С. 198–200.

48. Пройдак Ю.С. Влияние электрошлакового обогрева на питание усадки чугуновых прокатных валков / Пройдак Ю.С., **Меняйло Е.В.**, Хрычиков В.Е. // Материалы XIII международной н-т конф. – Запорожье. – 2017. – С. 230–233.

49. **Меняйло Е.В.** Исследование процесса затвердевания и образования усадочных дефектов в прокатном валке из высокопрочного чугуна / Меняйло Е.В., Хрычиков В.Е. // Новые материалы и технологии в машиностроении. Материалы IX международной н-т конф. – Киев. – 2017. – С.118–119.

50. **Меняйло Е.В.** Рациональная продолжительность комбинированного электродугового-электрошлакового обогрева прибылей слитков / Меняйло Е.В., Хрычиков В.Е. // Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейном производстве. Материалы VI международной н-т конф. – Краматорск. – 2017. – С. 91–92.

51. Хричиков В.Є. Твердофазне гідродинамічне модифікування Fe-C сплавів / Хричиков В.Є., **Меняйло О.В.**, Семенов О.Д. / Неметалеві вкраплення і гази у ливарних сплавах. Матеріали XV Міжнародної н-т конф. // Запоріжжя. – ЗНТУ. - 2018. - с. 67-68.

52. **Меняйло Е.В.** Влияние выделения скрытой теплоты кристаллизации на процесс затвердевания отливки в комбинированной кокильно-песчаной форме / Меняйло Е.В., Пройдак Ю.С., Хрычиков В.Е. // Литье. Металлургия. 2018. Материалы XIV Международной научно-практ. конф. // Под общ. ред. Пономаренко О.И.- Запорожье, ЗТПП.- 2018.-с. 194-195.

53. **Меняйло О.В.** Попередження утворення гарячих тріщин у поверхневому шарі чавунних прокатних валків / Меняйло О.В., Пройдак Ю.С., Хричиков В.Є.// Литво. 2019: XV Міжнарод. науково-практ. конф. Запоріжжя.- ЗНТУ.-2019.-с.148-150.

54. **Меняйло О.В.** Дослідження кінетики живлення усадки чавунних валків масою 8860 кг із високоміцного чавуну / Меняйло О.В., Пройдак Ю.С., Хричиков В.Є. // Перспективні технології, матеріали й обладнання в ливарному виробництві.- VII Міжнародна н-т конф. – Краматорськ: ДДМА, 2019. – С. 147.

*Навчальний посібник МОН України:*

55. Хричиков В.Е., **Меняйло О.В.** Ливарне виробництво чорних і кольорових металів / Навч. посібник. – Видання друге, доопрацьоване. Рекомендовано Міністерства освіти і науки України як навчальний посібник для

## АНОТАЦІЯ

**Меняйло О.В. Наукові і технологічні основи процесів спрямованого твердіння масивних виливків із залізвуглецевих сплавів у комбінованих кокільно-піщаних формах. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.16.04 «Ливарне виробництво». – Національна металургійна академія України МОН України, Дніпро, 2020.

Дисертація присвячена рішенням науково-технічної проблеми спрямованого твердіння масивних виливків із Fe-C сплавів, визначенню впливу комбінованої кокільно-піщаної форми на кінетику об'ємної усадки, встановленню тривалості електродугового-електрошлакового обігріву надливу на різних етапах утворення твердої фази у прокатних валках і злитках. Запропоновано ступінчастий режим обігріву прокатних валків з найвищою витратою електроенергії на першому етапі, який відповідає затвердінню рідко-твердої фази бочки валка і супроводжується максимальною усадкою розплаву з надливу, і меншою – на етапі твердіння шийок. Встановлено вплив комбінованої кокільно-піщаної ливарної форми на умови утворення усадкових дефектів у бочці і шийках прокатних валків та розроблені заходи по спрямованому твердінню виливків.

Встановлено час досягнення межі виливання, ліквідус і солідус у центр виливків з вмістом вуглецю 0,04 ... 4,83%, що мають форму плити, циліндра і кулі. Виведено графоаналітичні залежності для розрахунку тривалості затвердіння рідко-твердої і твердо-рідкої зон у виливках з Fe-C сплавів, що дозволяє прогнозувати зони з мінімальною і максимальною усадковою шпаристістю.

Для складних комплексно легованих і модифікованих сплавів з нестандартними температурно-часовими режимами лиття, у яких відсутні дані про об'ємну усадку і тривалість затвердіння, встановлено режими обігріву надливу провадити за показником кінетики переміщення розплаву у виливок: при відсутності переміщення електродів обігрів припиняють. Запропоновано гіпотезу процесу прискореного твердіння центральних зон виливків плоскої, циліндричної і кулястої форм по гетерогенному механізму, при якому гілки дендритів є додатковими центрами кристалізації. З метою зменшення кількості цементиту і транскристалічності структури в осьовій зоні чавунних прокатних валків визначено час і кількість графітизуючого модифікатора, який вводять у рідку серцевину після затвердіння робочого шару заданої товщини. Результати експериментальних та теоретичних досліджень апробовано і впроваджено у вальцеливарному цеху АТ "ДЗПВ" і в учбовому процесі НМетАУ.

**Ключові слова:** прокатний валок, злиток, надлив, твердіння, усадка, електродуговий-електрошлаковий обігрів, усадкові дефекти

## ABSTRACT

Menyailo E.V. Scientific and technological bases of processes of directed hardening of massive castings from ferrocarbon alloys in the combined chill-sand forms. – On the manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Engineering in specialty 05.16.04 "Foundry".- National Metallurgical Academy of Ukraine Ministry of Education of Ukraine, Dnieper, 2020.

The dissertation is devoted to solving the scientific and technical problem of directional solidification of massive castings from Fe-C alloys, determining the effect of the combined mold-sand mold on the kinetics of volume shrinkage, and establishing the duration of electric arc-electroslag heating arrived at different stages of the formation of the solid phase in rolling rolls and ingots. It is proposed to heat the rolling rolls in a stepwise mode with a high power consumption in the first stage, which corresponds to the hardening of the liquid-solid phase of the roll barrel and is accompanied by the maximum melt shrinkage from profit, and less during the neck hardening stage. The influence of the combined mold-and-sand casting mold on the conditions for the formation of shrinkage defects in the barrel and the necks of the rolling rolls is established, and measures have been developed for directional solidification of castings.

The duration of reaching the pouring fronts, liquids and solidus of the center of castings with a carbon content of 0.04 ... 4.83%, having the form of a plate, cylinder and ball, was established. Graphoanalytical dependences are derived for calculating the duration of solidification of liquid-solid and solid-liquid zones in castings from Fe-C alloys. The zones with the minimum and maximum duration of the alloy in the solid-liquid state during the solidification of the central (axial) part of the casting were established, which allows predicting the zones with the minimum and maximum shrinkage porosity.

For complex complex alloyed and modified alloys with non-standard temperature-time casting modes, in which there is no data on volume shrinkage and solidification duration, profit heating modes are established according to the kinetics of melt transfer to casting: in the absence of electrode movement, heating is stopped.

A hypothesis is proposed for the process of accelerated hardening of the central zones of castings of flat, cylindrical and spherical shape by a heterogeneous mechanism, in which the branches of dendrites are additional centers of crystallization. In order to reduce the amount of cementite and the transcrystallinity of the structure in the axial zone of cast iron rolls, the time and amount of a graphitizing modifier are established, which are introduced into the liquid core after the working layer has hardened to a predetermined thickness.

The results of experimental and theoretical studies were introduced in the valtsivarny workshop of SC "DZPV" and in the educational process NMetAU.

Key words: mill roll, ingot, profit, solidification, shrinkage, electric-electroslag burned, shrinkage defects