

*Здійнято  
до роботи спеціалізованої  
Вченої Ради ДФФ, 08.04.2021  
Лесеня СВР ДФФ  
04.12.2023р*

## РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу Семенова Олександра Дмитровича  
**«ВСТАНОВЛЕННЯ КІНЕТИКИ ФОРМУВАННЯ РІДКО-  
ТВЕРДОЇ ТА ТВЕРДО-РІДКОЇ ЗОН У ВИЛИВКАХ ІЗ  
ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВИХ СПЛАВІВ ТА РОЗРІДЖЕННЯ В  
ТЕПЛОВИХ ВУЗЛАХ ВИЛИВКІВ»,**  
представленої на здобуття наукового ступеня доктора філософії  
по спеціальності 136 «Металургія»

### Актуальність роботи

Одним із основних напрямків сучасної металургії та ливарного виробництва є підвищення якості та фізико-механічних властивостей литих виробів на підприємствах України, які забезпечують машинобудівні заводи і військово-промисловий комплекс деталями відповідального призначення.

В інтервалі температур твердіння утворюються ливарні дефекти, які обумовлені фазовим перетворенням сплавів з рідкого в твердий стан. При цьому усадка металу призводить до виникнення раковин, пористості, гарячих тріщин, утяжин, ливарних напружень та інше. Але в технічній літературі обмежено даних о процесах кінетики твердіння залізовуглецевих сплавів, що обумовлено необхідністю суміщення виміру температури у виливку за допомогою термопар, гарячі спаї яких потребують термозахисту, і виливання рідкої та рідко-твердої фази на різних етапах твердіння. Тільки на базі експериментальних досліджень термічних процесів твердіння, в яких в розплав вводять радіоактивні ізотопи, їх сучасної обробки і інтерпретації можливо встановити причини виникнення дефектів у виливках, розробити рекомендації по їх зменшенню і запропонувати способи впливу на процеси твердіння сплавів

в інтервалі температур ліквідус-солідус для підвищення експлуатаційних властивостей виливків.

Таким чином, робота, що направлена на встановлення кінетики твердіння фронтів виливання, солідус та ліквідус, зміни рідко-твердої та твердо-рідкої зон по товщині вилівка, розробка режимів впливу на метал в осьовій зоні в процесі твердіння та усунення утяжин у виливках, є актуальною і підтверджує відповідність її встановленим вимогам за ознакою «актуальність обраної теми дисертації».

### **Оцінка структури та змісту дисертації**

Дисертаційна робота складається зі вступу та основної частини з трьох розділів з висновком до кожного з них і списком використаних джерел (згідно п. 11 наказу Міністерства освіти № 40 від 12.01.2017 р.), загальних висновків і додатків.

Загальний обсяг дисертаційної роботи викладено на 157 сторінках машинописного тексту, містить 43 рисунки, 3 таблиці і 3 додатки.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційною роботи, надано інформацію щодо зв'язку роботи з науковими програмами, сформульовано її мету та завдання досліджень, вказано об'єкт, предмет та методи досліджень, викладено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, а також відомості щодо особистого внеску здобувача, апробацію отриманих результатів, представлені дані щодо структури та обсягу дисертації.

В першому розділі «Встановлення кінетики просування границі виливання, температур ліквідус і солідус у процесі твердіння сплавів залізо-вуглець у кокілях та виливницях циліндричної форми» автор спочатку провів аналіз науково-технічної літератури, сформулював постановку проблеми та встановив відсутність у літературі даних про тривалість знаходження Fe-C сплавів у рідко-твердому та твердо-рідкому стані. Це не дозволяє регулювати процеси твердіння виливків, розробляти методи втручання в процес твердіння центральних зон виливків для подрібнення мікроструктури, модифікування,

легування і розкислення металу. Крім того, відомі аналітичні розрахунки дозволяють отримати рішення тривалості твердіння в першому наближенні лише для 100% твердої фази. Тому в роботі автор використовує експериментальні дослідження наукової школи Б.Б. Гуляєва по твердінню Fe-C сплавів без домішок інших хімічних елементів. Тільки в цих експериментах в розплав введення радіоактивних ізотопів суміщено з виливання розплаву і вимірюванням температури на протязі всього процесу просування фронтів твердіння.

Далі автор визначив методи і методики досліджень, показав схему оцифрування експериментальних кінетичних кривих затвердіння Б.Б. Гуляєва за допомогою програми AutoCAD 2010, і отримав масив даних з 567 точок в координатах відносної товщини вилівка  $x/R$  та параметричного критерію  $\tau/R^2$ . За отриманими даними в програмі Excel було побудовано кореляційні криві кінетики твердіння границь ліквідус, солідус та виливання рідкого залишку сплавів залізовуглецевих сплавів в інтервалі 0,04 % до 4,83 % C.

Аналіз формування кристалічної структури і просування границь твердіння автор дисертації виконував за схемою Б.Б. Гуляєва і показав, що оцінку шару затверділого металу доцільно розраховувати не по температурі солідус, а по границі виливання. Це підтверджує дослідження Б.Б. Гуляєва процесу твердіння за допомогою радіоактивних ізотопів  $W^{185}$ ,  $Ag^{110}$ ,  $Ca^{45}$ ,  $Co^{60}$ ,  $Zn^{65}$ ,  $Zr^{94}$ , яке показало, що радіоактивний ізотоп не поширюється за границю виливаємості.

Приклади використання результатів інтерполяції оцифрованих експериментальних досліджень кінетики твердіння солідус, виливання та ліквідус сплавів з вмістом вуглецю від 0,04 % до 4,83 % є цінними та практичними, тому дозволяють розрахувати час твердіння заданої товщини робочого шару та залишку рідкого металу в осьовій зоні виливків різного розміру, що охолоджуються в кокілі. Тому автор пропонує вводити модифікатор, розкислювач або феросплав в центральну частину вилівка, яка ще не затверділа. Поступове розплавлення цих добавок забезпечить плавну

зміну хімічного складу, мікро- і макроструктури між робочим шаром і осьовою зоною. Раніше таких розрахунків по границі виливання не проводили і не розглядали.

Вперше автор по результатам отриманих кореляційних залежностей встановив особливості кінетики твердіння сталей з вмістом вуглецю 0,20%, 0,25%, 0,45%, 0,55%, 0,80%, 1,20%, 1,80%, показав приклади використання їх для удосконалення технологічних процесів лиття.

Крім того, дисертант виконав розрахунок часу модифікування осьової зони і маси модифікатора для прокатних валків із заєвтектоїдної адамітової сталі 150ХНМ в умовах ливарного цеху Дніпропетровського заводу прокатних валків. На прикладі бочки валка масою 2080 кг з діаметром 520 мм і висотою 1400 мм розраховано масу рідкого та рідко-твердого металу в осьовій зоні та масу алюмінію для графітізуючого модифікування.

Автор критично оцінив отримані результати і показав їх обмеженість у використанні, але значно більшу точність у порівнянні з рівнянням квадратного кореня, в якому коефіцієнт затвердіння постійний і не змінюється на протязі твердіння сплаву від поверхні до центру виливка. Параметричний критерій Б.Б.Гуляєва  $G_u$  у розрахунках постійно змінюється при твердінні сплаву в інтервалі від 0 до  $1 \cdot x/R$ , що має принципову важливість і підвищує точність розрахунків кінетики твердіння.

Тому автор рекомендує використовувати отримані результати в розділі 1 також для оцінки точності комп'ютерного моделювання процесів затвердіння сплавів Fe-C і подальшої адаптації математичних моделей завдяки корегуванню теплофізичних коефіцієнтів для металу виливків і матеріалу ливарної форми.

В другому розділі автор спочатку провів аналіз науково-технічної літератури і загострив увагу на те, що при виробництві чавунних прокатних валків наявність карбідної сітки в шийках і бочці знижують експлуатаційну властивості валків. Саме тому необхідно обмежувати наявність карбідної сітки в шийках і трехах, а також карбідів в осьовій зоні. Також автор зазначив о існуючих можливостях модифікування розплаву в литниковій системі в процесі

залиття ливарної форми. Проте, такі способи використовують тільки для виробництва виливків невеликої маси. Розрахувати кінетику твердіння для масивних виливків, якими є чавунні прокатні валки, методом математичного моделювання не завжди можливо.

В роботі виконано розрахунок маси рідкого та рідко-твердого осередку в чавунних прокатних валках після твердіння робочого шару. Наведено схему ливарної форми для реалізації процесу введення алюмінію в осьову зону валка к фронту твердіння після затвердіння робочого шару. Удосконалено процес розплавлення алюмінію і його розподілу по висоті валка за рахунок обертання електричним двигуном алюмінію і його переміщенню відцентровими силами к фронту твердіння бочки і шийок.

Виконано розрахунок часу модифікування осьової зони і маси модифікатора для прокатного валка масою 1,044 кг (чорною масою 1619 кг). Практичне випробування розробки в умовах ливарного цеху Дніпропетровського заводу прокатних валків показало, що відбілений робочий шар у бочці лише на  $\approx 8\%$  більше у порівнянні з розрахунком по границі виливання, що підтверджує доцільність прийнятої методики. Це дозволило зменшити утворення карбідів і карбідної сітки в осьовій зоні, підвищити експлуатаційні властивості, а в подальшому розробити нові способи виготовлення біметалевих валків за рахунок фізико-механічного впливу на рідко-тверду зону. Розроблено та отримано два патенти на чавун для робочого шару прокатних валків.

**В третьому розділі** автор провів аналіз особливостей утворення ливарного дефекту «утяжина», показав, що в теорії ливарних процесів причини виникнення утяжини досі повністю не з'ясовані. Виникнення таких дефектів показано на сталевих виливках, чавунних прокатних валках після електрошлакового обігріву надливу та окремих художніх виливках. Дисертант встановив, що причиною виникнення утяжин є формування в масивних частинах виливка теплових вузлів, з центру яких розплав фільтрується для живлення усадки затверділого шару на всі найближчі поверхні виливка. При

переміщенні розплаву з теплового вузла в його центрі утворюється усадкова раковина та розрідження. Тому атмосферний тиск приводить до втягування і викривлення затверділого шару металу на частині поверхні виливка з меншою міцністю.

В дисертації вперше розроблено оригінальну методику для вимірювання розрідження в усадковій раковині, яка засновано на використанні голки медичної спинальної з неіржавіючої сталі. Експериментальне дослідження розрідження в усадковій раковині виконано на виливку у формі куля Ø 120 мм з одночасним вимірюванням термопарою твердіння центру кулі у піщано-глинистій формі. Запропоновано скоригувати термін «утяжина» в діючому державному стандарту України (ДСТУ 9051:2020. Виливки з чавуну і сталі. Дефекти. Терміни та визначення. Чинний від 2021-04-01). Розробка прийнята для впровадження Технічним комітетом стандартизації 177 «Ливарне виробництво», акт від 24.04.2023 р.

На прикладі художнього виливка «Буйвол» спрощено технологію лиття і усунуто утяжину. Запропонована технологія вирівнювання тиску в тепловому вузлі виливка з атмосферним не усуває усадкову раковину і пористість в середині виливку, але автор відмітив, що внутрішні дефекти в середині виливка не контролюються на відміну від високих вимог до точності форми поверхонь художніх литих виробів.

По результатам експериментальних досліджень розроблено і отримано патент України на винахід «Спосіб усунення утяжин у виливках з потовщеними частинами стінки», в якому попередження утворення «утяжин» у виливках здійснено при з'єднанні усадкової порожнини термічного вузла виливка з атмосферою навколишнього середовища по тонкій трубчастій голці, температура плавлення якої більше температури металу, що заливають.

У загальних висновках дисертації викладено найбільш важливі наукові та практичні результати, що були отримані в процесі дисертаційного дослідження, які сприяли розв'язанню сформульованого науково-прикладного завдання.

Список джерел, які були використані в аналітичному огляді і при аналізі результатів експериментальних досліджень, достатньо повно охоплює зазначену галузь знань та відображає основні напрями розвитку досліджень та технології лиття виливків.

Матеріали дисертації виконані послідовно, а їх оформлення відповідає вимогам щодо дисертацій на присвоєння вченого звання доктора філософії. Мова і стиль дисертації забезпечують доступність сприйняття викладених матеріалів досліджень, наукових положень, висновків і рекомендацій. Дисертація написана та оформлена відповідно до вимог щодо дисертацій доктора філософії.

### **Наукові результати дисертації**

1. Вперше теоретично визначено вплив хімічного складу залізовуглецевих сплавів у діапазоні 0,04...4,83 %C на кінетику просування фронтів твердіння виливання, солідус і ліквідус у циліндричних виливках за параметричним критерієм  $\tau/R^2$  і відносним розміром  $x/R$ , що дозволило встановити тривалість знаходження розплаву у рідко-твердій і твердо-рідкій зонах в процесі твердіння від поверхні до центру виливків різних розмірів, що охолоджуються у кокілі.

Експериментальні дослідження кінетики виливання рідкого залишку, що поєднані з введенням радіоактивних індикаторів ізотопів і об'єднані з вимірами процесу твердіння виливків, відомі тільки при вмістах вуглецю 0,04%; 0,10%; 0,40%; 0,93%; 1,42%; 2,44%; 3,28%; 4,45% та 4,83%, але відсутні дані про кінетику процесу твердіння для всього іншого діапазону хімічних складів. Отримані криві кінетики твердіння залізовуглецевих сплавів у діапазоні 0,04...4,83 %C дозволяють розрахувати масу рідкої та рідко-твердої зон металу і встановити масу графітуючого модифікатора для ведення в осьову зону виливка, що підвищує його фізико-механічні властивості.

2. Вперше розрахунок процесу графітуючого модифікування алюмінієм осьової зони чавунних прокатних валків встановлено по кількості

рідкої та рідко-твердої фаз, що залишаються після твердіння робочого шару в бочках та шийках валків різних розмірів, розподілу алюмінію по висоті і радіусу виливків при відцентровому обертанні алюмінію в осьовій зоні.

Раніше при розрахунку шару затверділого металу по температурі солідус було неможливо точно встановити об'єм рідкого металу в осьовій зоні шийок і бочки валка, що унеможливило точний розрахунок маси графітуючого модифікатора, а розміщення алюмінію в нижній частині вилівка не забезпечувало його швидке спливання і проникнення до робочого шару бочки. Отримані результати виконання процесу графітуючого модифікування дозволять усунути утворення карбідів і карбідної сітки в осьовій зоні прокатних валків, підвищити їх експлуатаційні властивості, а в подальшому розробити нові способи виготовлення біметалевих валків за рахунок фізико-механічного впливу на рідко-тверду зону.

3. Вперше експериментально визначено та уточнено, що причиною появи на поверхні вилівка ливарного дефекту «утяжина» є розрідження в усадковій раковині теплового вузла в потовщеній частині вилівка поблизу дефекту і зсідання металу на частині поверхні вилівка з меншою міцністю.

Виникнення утяжини раніше не пов'язували з утворенням теплового вузла і усадкової раковини. Отримані результати дозволяють скорегувати діючий термін в ДСТУ 9051:2020 з «Утяжина – дефект у вигляді заглибини із закругленими краями на поверхні вилівка, яка утворилася внаслідок зсідання металу під час твердіння» на «Утяжина – дефект у вигляді заглибини із закругленими краями на поверхні вилівка, який формувався поблизу теплового вузла і усадкової раковини, де виникає розрідження і зсідання металу на частині поверхні вилівка з меншою міцністю».

4. Вперше попередження утворення «утяжин» у вилівках здійснено при з'єднанні усадкової порожнини термічного вузла вилівка з атмосферою навколишнього середовища по тонкій трубчастій голці, температура плавлення якої більша за температуру рідкого металу, що заливають у форму.



Раніше утворення «утяжин» у художніх виливках зменшували встановленням стрижня, але у виливках з невеликими розмірами зробити стрижень, який відображує конфігурацію внутрішній поверхні художнього виробу, та закріпити його у порожнині форми технологічно важко. Усунення утяжин у фасонних і художніх виливках зі збільшеною товщиною стінки забезпечує встановлення голки медичної трубчастої, один кінець якої розміщують в центрі теплового вузла, другий закріплюють в стінці ливарної форми з боку неробочої поверхні вилівка і з'єднують з атмосферою.

### **Практична значимість:**

1. Розроблено рекомендації по підвищенню експлуатаційних властивостей чавунних прокатних валків за рахунок графітізуючого модифікування рідкої та рідко-твердої зон вилівка після твердіння робочого шару, який розраховували по границі виливання за встановленими формулами.

2. Рекомендовано результати розрахунків кінетики просування від поверхні до центру вилівка фронтів твердіння солідус, виливання і ліквідус у циліндричних виливках за параметричним критерієм  $\tau/R^2$  і відносним розміром  $x/R$  використовувати для оцінки точності комп'ютерного моделювання процесів твердіння сплавів Fe-C і подальшого корегування теплофізичних коефіцієнтів, які прийняті в розрахунках.

3. Запропоновано для усунення ливарного дефекту «утяжина» в виливках зі стінками різної товщини установлювати в центр усадкової раковини голку медичну із аустенітної неіржавіючої сталі, а другий кінець голки з'єднати з атмосферним повітрям і розміщувати в ливарній формі з боку не робочої поверхні, що недоступна для огляду і не порушує естетичний вид вилівка. Розроблені рекомендації захищені патентом України № 127278 «Спосіб усунення утяжин у виливках з потовщеними частинами стінки».

4. Впроваджено результати дисертаційної роботи в учбовий процес кафедри ливарного виробництва ННІ ІПБТ Українського державного університету науки та технологій (акт від 03.05.2023 р.).

5. Прийнято для впровадження рекомендації щодо зміни в ДСТУ 9051:2020 (Виливки з чавуну і сталі. Дефекти. Терміни та визначення) діючого терміну "Утяжина – дефект у вигляді заглибини із закругленими краями на поверхні виливка, яка утворилася внаслідок зсідання металу під час твердіння" на скорегований за результатами роботи: "Утяжина – дефект у вигляді заглибини із закругленими краями на поверхні виливка, який формувався поблизу теплового вузла і усадкової раковини, де виникає розрідження і зсідання металу на частині поверхні виливка з меншою міцністю" (акт від 24.04.2023 р. Технічного комітету стандартизації 177 «Ливарне виробництво»).

#### **Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях**

За результатами виконаних досліджень опубліковано 17 друкованих праць, в тому числі: у 2 виданнях, що індексуються у базі даних Scopus на англійській мові; у 4 фахових виданнях; у 3 патентах України на винахід; 1 видання, що не входить до переліку фахових; у 7 тезах доповідей на міжнародних науково-технічних та науково-практичних конференціях, одна з яких за кордоном.

#### **Зауваження по дисертаційній роботі**

По дисертаційній роботі можна зробити наступні зауваження:

1. В розділі 2 наведено патент України № 116726 «Чавун для прокатних валків», в якому запропоновано хімічний склад робочого шару, що має підвищені фізико-механічні властивості. Однак, доцільно було навести мікроструктури дослідних зразків чавуну для підтвердження результатів.

2. В розділі 2.4 наведено патент України № 116725, в якому запропоновано хімічний склад робочого шару білого чавуну для прокатних валків та куль для млинів, і яких подрібнюють портландцемент, гіпс та інші матеріали. Однак, доцільно було навести мікроструктури дослідних зразків чавуну для підтвердження результатів.

3. У рукопису дисертації зустрічаються орфографічні та стилістичні помилки, наприклад, на стор. 56, останній абзац: «Результати. Отримані в нашій роботі...»; на стор. 77, останній абзац: «нижньї шийки», а потрібно

«нижньої шийки»; на стор. 97, другий абзац: «термостійкості», а потрібно «термостійкості».

Однак, зроблені зауваження не знижують загальної позитивної оцінки дисертації.

### **Відповідність змісту дисертації спеціальності**

Дисертаційна робота Семенова О. Д. «Встановлення кінетики формування рідко-твердої та твердо-рідкої зон у виливках із залізовуглецевих сплавів та розрідження в теплових вузлах виливків», за своїм змістом відповідає паспорту спеціальності 136 «Металургія».

### **Загальний висновок та оцінка роботи**

Дисертаційна робота Семенова Олександра Дмитровича на тему «Встановлення кінетики формування рідко-твердої та твердо-рідкої зон у виливках із залізовуглецевих сплавів та розрідження в теплових вузлах виливків» є завершеним науково-прикладним дослідженням, виконаним на високому науковому рівні та відповідає вимогам, передбаченим «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №44 від 12 січня 2022 р.), положенням Вимог до оформлення дисертації (затверджених наказом Міністерства освіти і науки України №40 від 12 січня 2017 р.), а здобувач **Семенов Олександр Дмитрович** заслуговує на присудження **наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 136 – «Металургія».**

Офіційний рецензент: доцент кафедри

теоретичних основ металургійних процесів

Українського державного університету науки та

технологій, кандидат технічних наук, доцент **Олександр ГРИШИН**

Підпис к. т. н., доцента Олександра Гришина **ЗАСВІДЧУЮ:**



начальник відділу кадрів

**В.С. Шифрін**