

Філія Київського
національного університету
«Львівська політехніка»
Львів, вул. Св. Юліана, 5
м. 12. 2023

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»

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, загальних висновків і додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи викладено на 157 сторінках машинописного тексту, з яких 132 сторінки основного тексту, містить 43 рисунки, 3 таблиці і 3 додатки.

Структура роботи по складу та послідовності розділів логічна та відповідає вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

У **вступі** обґрунтовано актуальність вибору теми дисертаційної роботи, надано інформацію щодо зв'язку роботи з науковими програмами, планами, темами, 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, апробації отриманих результатів, представленні 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 виконав аналітичний огляд стану питання, обґрунтував вибір напрямку досліджень та

сформулював завдання першого розділу роботи. Показав, що відомі аналітичні розрахунки за рівнянням квадратного кореню для плаского напівнескінченного вилівка, метод Фур'є, метод кінцевих інтегральних перетворень, операційний метод, метод функцій Гріна, інтегралу теплового балансу А.І. Вейника та Т. Гудмена дозволяють отримати рішення лише в першому наближенні.

Дисертант відмітив, що для виливків зі складною конфігурацією найбільш точні і повні рішення задач твердіння, утворення усадкових дефектів, напружень можна одержати застосовуючи чисельні методи розрахунку, засновані на кінцево-різницевих схемах, що дозволяє використовувати ПК. Але для підвищення точності цих розрахунків необхідно знати залежність теплофізичних коефіцієнтів сплаву і матеріалу ливарної форми від температури, які не завжди точно відомі. Тому експериментальні дослідження процесів затвердіння виливків різних хімічних складів є базовими для адаптації математичних моделей і отримання достовірних еталонних розрахунків, які потім можливо розповсюдити на виливки зі складною конфігурацією.

Звернув увагу на відсутність у літературі даних про тривалість знаходження Fe-C сплавів у рідко-твердому та твердо-рідкому стані в інтервалі температур твердіння ліквідус-солідус, що не дозволяє регулювати процеси кристалізації виливків та розробляти методи втручання в процес твердіння осьових зон. Отому автор в роботі використовує експериментальні дослідження Б.Б. Гуляєва твердіння Fe-C сплавів, які суміщені з вимірюванням температури, виливанням розплаву і введенням радіоактивних ізотопів в рідкий метал осьової зони.

Оцифрування експериментальних кінетичних кривих затвердіння Б.Б.Гуляєва дисертант виконував за допомогою програми AutoCAD 2010, отримав масив даних в координатах параметричного критерію τ/R^2 та відносної товщини вилівка x/R , а потім в програмі Excel побудував кореляційні криві кінетики твердіння границі солідус сплавів залізовуглець в інтервалі від 0,04 % до 4,83 % C. Наведено приклади використання отриманих графіків, які

дозволяють у першому наближенні розрахувати по параметричному критерію τ/R^2 тривалість твердіння вилівка в інтервалі температур ліквідус-солідус по всій товщині вилівка. Порівняв отримані результати з розрахунком за відомим законом "квадратного кореня" для вилівоків зі сталі і відмітив, що, згідно літературним даним, коефіцієнт твердіння ($k = 0,3-0,35 \text{ см/с}^{0,5}$) постійний для всього діапазону сплавів з вмістом вуглецю до 2%.

Так, у порівнянні з експериментальними вимірами для сталі з 0,1% С тривалість твердіння менша у порівнянні з розрахунком по рівнянню квадратного кореня в 2,7-3,7 разів, а для сталі з 0,4% С в 2,3-3,1 рази. Тому отримані результати доцільно використовувати для більш точного встановлення мінімального часу, з якого безпечно переміщувати вилівницю зі злитком з робочого кесону до ділянки охолодження вилівоків, і реалізацію технології гарячого посаду вилівка в термічну піч.

Отримані автором результати для твердіння 100% твердої фази циліндричних вилівоків можливо використовувати для вилівоків пласкої і кулястої форми по співвідношенню М.І. Хворінова ($\tau_n : \tau_u : \tau_k = 1 : 0,25 : 0,11$).

Також для практичного використання автор запропонував приклад розрахунку часу введення алюмінію в осьову зону циліндричного вилівка по кінетиці просування границі солідус після затвердіння заданої товщини робочого шару сплаву.

Приведено розрахунок кінетики процесу твердіння фронту вилівання в сплавах системи Fe-C, яка встановлена за наведеною вище методикою. Отримано 20 кривих із кроком відносної товщини затверділого шару металу $0,05 \ x/R$ від поверхні до центру циліндричного вилівка в координатах параметричного критерію τ/R^2 і відносної товщини вилівка x/R . Встановлено вплив вмісту вуглецю на тривалість просування фронту вилівання, що дозволило підвищити точність розрахунку твердіння робочого шару на вилівниці, розрахувати час ведення графітуючих елементів і розкислювачів в рідку і рідко-тверду зону .

Також автор встановив вплив вмісту вуглецю на параметричний критерій τ/R^2 процесу твердіння границі ліквідус в сплавах Fe-C в діапазоні 0,04...4,83%С при охолодженні в циліндричному кокілі. На відміну від попередніх результатів кінетики твердіння солідус мінімальна тривалість твердіння ліквідус відповідає сплавам евтектичного складу, а максимум – при $\approx 0,1\%C$ і $\approx 1\%C$. Отримані результати автор пояснює тривалою температурною зупинкою на кривих охолодження при температурі ліквідус, а при температурі солідус на кривій охолодження видно лише перегин. Це свідчить про більшу частку виділення прихованої теплоти твердіння при температурі ліквідус, яка збільшує тривалість охолодження. Підтвердженням цих висновків автора є данні Ю. А. Нехендзі про змінення кількості твердої фази на діаграмі Fe-C при температурі на $5^{\circ}C$ нижче ліквідус.

По результатам отриманих графіків твердіння сплавів системи Fe-C автор вперше побудував криві кінетики твердіння сталей з вмістом вуглецю 0,20%, 0,25%, 0,45%, 0,55%, 0,80%, 1,20%, 1,80% і показав можливість використання результатів дисертації для встановлення кінетики твердіння всіх сплавів в діапазоні 0,04...4,83%С при охолодженні в кокілі.

На прикладі лиття прокатного валка масою 2080 кг із заевтектоїдної адамітової сталі 150ХНМ в умовах ливарного цеху Дніпропетровського заводу прокатних валків автор розрахував масу рідкого та рідко-твердого металу в осьовій зоні та масу алюмінію для графітизуючого модифікування.

Наприкінці першого розділу дисертант показав границі використання отриманих результатів і рекомендував використовувати їх 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 «Розробка процесу графітизуючого модифікування рідкої та рідко-твердої частин прокатних валків після твердіння робочого шару» розглянуто виробництво чавунних прокатних валків в умовах ливарного цеху Дніпропетровського заводу прокатних валків. Згідно діючим вимогам

споживачів продукції необхідно обмежувати наявність цементиту і карбідної сітки в осьовій зоні прокатних валків. Тому автор критично розглянув відомі способи графітизуючого модифікування осьової зони і запропонував розрахунок маси рідкого та рідко-твердого залишку чавуну в осьовій зоні після твердіння необхідного шару зносостійкого чавуну в бочці прокатного валка.

Цікавим рішенням є пропозиція розміщувати графітизуючий модифікатор (алюміній) на сталевій арматурі і занурювати її в осьову зону валка, а для переміщення алюмінію к фронту твердіння обертати сталеву арматуру електричним двигуном.

На прикладі прокатного валка з чорною масою 1619 кг приведено розрахунок маси рідкого та рідко-твердого залишку чавуну, маси алюмінію 0,887 кг та час його введення в валок. Після охолодження валка відбілений робочий шар лише на $\approx 8\%$ більше необхідного. Тому доцільність розрахунків по границі виливання підтверджено експериментально.

У подальшому наведену у роботі методику розрахунку можливо використати для фізико-механічного впливу на метал, наприклад, перемішування, введення лігатур і модифікаторів, що підвищить якість макро- і мікроструктури. В підрозділі 2.4 наведено методи підвищення фізико-механічних властивостей робочого шару прокатних валків і куль в млинах, приведено хімічні склади чавунів і патенти.

В третьому розділі «Дослідження процесу утворення розрідження в усадковій раковині при твердінні виливків» автор розглянув особливості утворення ливарного дефекту «утяжина», його формулювання згідно ДСТУ 9051:2020 Виливки з чавуну і сталі. Дефекти. Терміни та визначення. Відзначив відмінність утяжини від усадкової раковини. При цьому зв'язав утворення утяжини поблизу усадкових раковин у чавунних прокатних валках та виливків зі сталі. Спочатку автор припустив, що причиною виникнення утяжини є формування теплових вузлів і усадкових раковин в масивних частинах виливка, утворення розрідження в усадковій раковині, що призводить до втягування і

викривлення шару металу, що твердіє, на частині поверхні вилівка з меншою міцністю.

Розроблена оригінальна методика вимірювання розрідження в усадковій раковині, яка засновано на використанні голки медичної спинальної з неіржавіючої сталі з отвором $\varnothing 0,44$ мм, що виключає проникнення розплаву в її середину. За нею досліджено кінетику утворення розрідження в усадковій раковині вилівка у формі куля $\varnothing 120$ мм та процес твердіння центру кулі у піщано-глинистій формі. Зміна різниці рівня висоти водяних стовпів у U-образному водяному манометрі в центрі усадкової раковини вилівка становить 80 мм. На вилівку після охолодження та очищення від залишків формувальної суміші зафіксовано утворення утяжини у верхній частині, що підтверджує гіпотезу автора.

За результатами експериментальних досліджень дисертант запропонував скорегувати діючий термін в ДСТУ 9051:2020 на «Утяжина – дефект у вигляді заглибини із закругленими краями на поверхні вилівка, яка формувалася поблизу теплового вузла і усадкової раковини, де виникло розрідження і зсідання металу на частині поверхні вилівка з меншою міцністю». Розробка прийнята для впровадження Технічним комітетом стандартизації 177 «Ливарне виробництво», акт від 24.04.2023 р.

Підтвердження розробки автор виконав в розділі 3.4 для усунення утяжини у художньому вилівку, який виготовляють литтям по моделям, що витоплюються. Крім того, запропонована нова ливниково-живлюча система, яка не потребує масивного центрального ливника в тепловий вузол. Завдяки чому зменшується необхідна маса металу для лиття та час на виготовлення воскової заготовки.

По результатам експериментів розроблено і отримано патент України UA №127278 на новий спосіб усунення утяжин у вилівках з потовщеними частинами стінки. В них виникають теплові вузли, які з'єднують 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 дисертаційній роботі і 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.

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 τ/R^2 і відносним розміром x/R , що дозволило встановити тривалість находження 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 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 графітізуючого модифікатора для ведення в осьову зону виливка, що підвищує його фізико-механічні властивості.

2. Вперше розрахунок процесу графітізуючого 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 унеможлилювало точний розрахунок маси графітізуючого модифікатора, а розміщення алюмінію в нижній частині виливка не забезпечувало його швидке спливання і проникнення до робочого шару бочки. Отримані результати виконання процесу графітізуючого 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 виливка ливарного дефекту «утяжина» є розрідження в усадковій раковині теплового вузла в потовщеній частині виливка поблизу дефекту і зсідання металу на частині поверхні виливка 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 виливка, яка утворилася внаслідок зсідання металу під час твердіння» на «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».

4. Вперше 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 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 графітизуючого 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 τ/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 ПІБТ 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 1.1 «Постановка проблеми та стан питання» доцільно навести обґрунтування використання критерію Б. Б. Гуляєва, а автор це зробив в розділі 1.7 «Обговорення границь використання отриманих результатів у ливарному виробництві».

2. В розділі 2.4 наведено патент України № 116726 «Чавун для прокатних валків», в якому запропоновано хімічний склад робочого шару, що має підвищені фізико-механічні властивості. Проте, недостатньо обґрунтовано обрані границі введення хімічних елементів у чавун.

3. В розділі 2.4 наведено патент України № 116725, в якому запропоновано хімічний склад робочого шару білого чавуну для прокатних валків та куль для млинів, в яких подрібнюють портландцемент, гіпс та інші матеріали. Проте, границі введення хімічних елементів у чавун недостатньо аргументовані.

4. У рукопису дисертації зустрічаються орфографічні та стилістичні помилки, наприклад, на стор. 97, другий абзац: «термостійкісті», а потрібно «термостійкості»; на стор. 113, перший абзац: «це дозволила», а потрібно «це дозволило»; на стор. 117, останній абзац «U-образному манометрі», а потрібно «U-подібному манометрі».

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». Матеріали дисертації викладені послідовно, а їх оформлення відповідає вимогам щодо дисертацій на присвоєння вченого звання доктора філософії. Мова і стиль дисертації забезпечують доступність сприйняття результатів досліджень, наукових положень, висновків і рекомендацій.

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:

професор кафедри електрометалургії
ім. акад. М.І. Гасика Українського
державного університету науки та технологій
кандидат технічних наук, професор



Антон ГОРОБЕЦЬ

Підпис к. т. н., професора Горобця А.П. ЗАСВІДЧУЮ:

