

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, з яких 132 сторінки основного тексту, містить 43 рисунки, 3 таблиці і 3 додатки, 102 посилання на літературу. 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.

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.

Розділи дисертації висвітлено в опублікованих працях Семенова О. Д. згідно номерам, наведеним у списку дисертації:

- Розділ 1 – фахові №3, №5, №6; доповіді на конференціях №16.
- Розділ 2 – Scopus №2; не фахові №7; патент №8, №9; в доповіді на конференціях №13, №14, №15.
- Розділ 3 - Scopus №1, фахові №4; патент №10; в доповіді на конференціях №11, №12, №17.

У вступі автор обґрунтував актуальність теми дисертаційною роботою, надав інформацію щодо зв'язку роботи з науковими програмами, сформулював мету та завдання досліджень, вказав об'єкт, предмет та методи досліджень, виклав наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів,

відомості щодо особистого внеску здобувача і апробацію отриманих результатів.

В першому розділі «Встановлення кінетики просування границі виливання, температур ліквідус і солідус у процесі твердіння сплавів залізо-вуглець у кокілях та виливницях циліндричної форми» дисертант провів аналіз науково-технічної літератури, сформулював постановку проблеми: температури ліквідус і солідус значної частини сплавів системи Fe-C встановлені, але кінетика зміни рідко-твердої та твердо-рідкої зон по товщині вилівка, положення границі виливання між цими зонами відомі тільки для окремих залізовуглецевих сплавів, що охолоджуються в кокілях та виливницях. Відсутність таких даних не дозволяє регулювати процеси твердіння виливків, розробляти методи втручання в процес твердіння центральних зон виливків для подрібнення мікроструктури, модифікування, легування і розкислення металу.

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. У варіаційних методах використовується припущення про кінцеву глибину проникнення теплового потоку і задана наперед форма рішення. Автор відмітив, що в рівнянні квадратного кореня коефіцієнт k залежить від зміни великої кількості теплофізичних коефіцієнтів сплаву в інтервалі температур кристалізації, які змінюються в процесі охолодження і точно не відомі. Сучасні програми комп'ютерного моделювання ProCast, AFSolid (SolidCast), Полігон, LVMFow (NovaFlow), Magma, Sitest (WinCast), Simulor (Pamcast), CastCAE також не дозволяють точно встановити процес відведення тепла від вилівка в ливарну форму, а залежність теплофізичних коефіцієнтів від температури встановлюють орієнтовно по літературним даним, які виконані в лабораторних умовах. Тому експериментальні дослідження процесів затвердіння виливків різних хімічних

складів є базовими для адаптації математичних моделей і отримання достовірних еталонних розрахунків.

В роботі автор використовує експериментальні дослідження Б.Б. Гуляєва, О. Н. Магницького, Л. М. Постнова по твердінню Fe-C сплавів без домішок інших хімічних елементів. Тільки в цих експериментах в розплав введення радіоактивних ізотопів W^{185} , Ag^{110} , Ca^{45} , Co^{60} , Zn^{65} , Zr^{94} суміщено з виливання розплаву і вимірюванням температури на протязі всього процесу просування фронтів твердіння. Автор виконав оцифровку дев'яти експериментальних досліджень твердіння сплавів Fe-C з вмістом вуглецю 0,04%, 0,10%, 0,40%, 0,93%, 1,42%; 2,44%, 3,28%, 4,45%, 4,83%, отримав масив даних в координатах відносної товщини затверділого шару металу x/R і параметричного критерію τ/R^2 . Вперше дисертант побудував графіки кінетики твердіння границь виливання, солідус та ліквідус для діапазону хімічних складів 0,04 ... 4,83%С, що дозволило розрахувати масу рідкої та рідко-твердої зон металу, встановити масу графітуючого модифікатора для ведення в осьову зону виливка і підвищити його фізико-механічні властивості.

Вперше отримані криві просування границі виливання для сплавів заліза з вмістом вуглецю 0,15%, 0,20%, 0,25%, 0,45%, 0,55%, 0,80%, 1,20%, 1,80%, які дозволяють реалізувати виробництво виливків і злитків за технологією у якій: після кристалізації заданого робочого шару металу на виливниці розраховують необхідну кількість модифікатора, розкислювача або феросплаву для введення в рідко-тверду і рідку зону виливка, яка ще не затверділа. Поступове розплавлення цих хімічних сполук забезпечує плавну зміну мікро- і макроструктури між робочим шаром і осьовою зоною.

Встановлено, що для розроблення режимів фізико-хімічної дії на метал в середині виливка після затвердіння робочого шару, більш точним є використання даних про знаходжені границі виливання, а не розрахунок по границі солідус, що використовували раніше. Запропоновано методику розрахунку маси і часу введення графітуючого модифікатора в осьову зону циліндричних виливків різних розмірів відповідно до кількості рідкої та рідко-

твердої фаз, які залишаються після твердіння робочого шару у кокілі. Це експериментально підтверджено на вилівку із заевтектоїдної сталі із 1,8%С масою 2080 кг.

Отримані за експериментальними дослідженнями розрахунки кінетики просування фронтів твердіння ліквідус, солідус і виливання рідкого металу від поверхні до центру виливків за параметричним критерієм τ/R^2 і відносним розміром x/R доцільно використовувати для оцінки точності комп'ютерного моделювання процесів твердіння 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» автор розглянув особливості виробництва чавунних прокатних валків і показав, що наявність карбідної сітки в шийках і бочці знижують експлуатаційні властивості валків. Тому для попередження їх утворення необхідно проводити графітизацію осьової зони тільки після твердіння робочого шару в бочці валка.

Автором 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 розподіл по висоті валка за рахунок обертання електричним двигуном алюмінію і його переміщенню відцентровими силами к фронту твердіння бочки і шийок.

В умовах ливарного цеху Дніпропетровського заводу прокатних валків відлито прокатний валок масою 1,044 кг (чорною масою 1619 кг) за запропонованою технологією і показано, що відбілений робочий шар у бочці лише на $\approx 8\%$ більше у порівнянні з розрахунком по границі виливання, що підтверджує доцільність прийнятої методики у порівнянні з розрахунками по границі солідус.

Розроблено та отримано патент на чавун для робочого шару прокатних валків, який забезпечив підвищення термостійкості на 15-27 %, відносного подовження на 10-18 %, а модулю пружності менший на 9-12 % ніж відомого.

Також розроблено для куль в млинах більш дешевий нелегований білий чавун, який забезпечив підвищення зносостійкості на 12-28%, границі міцності при вигині на 16-23%, а термостійкості – на 45-50% у порівнянні з відомим.

В третьому розділі «Дослідження процесу утворення розрідження в усадковій раковині при твердінні виливків» автор розглянув механізм і існуючі теорії утворення ливарного дефекту «утяжина». Проаналізував терміни і визначення дефекту «утяжина» згідно діючому ДСТУ 9051:2020. На прикладі різних виливків зі сталі і чавуну показав, що утяжина утворюється поблизу усадкової раковини. Тому дисертант припустив, що причиною виникнення утяжин є формування в масивних частинах вилівка теплових вузлів, з центру яких розплав фільтрується для живлення усадки затверділого шару на всі найближчі поверхні вилівка. При переміщенні розплаву з теплового вузла в його центрі утворюється усадкова раковина (стор. 113, рис. 3.5) та розрідження (P_0). Тому атмосферний тиск (P_{at}) призводить до втягування і викривлення затверділого шару металу на частині поверхні вилівка з меншою міцністю.

Автором вперше розроблено пристрій для вимірювання розрідження в усадковій раковині, який засновано на використанні голки медичної спинальної з нержавіючої сталі з зовнішнім діаметром 0,7 мм та отвором діаметром 0,44 мм, що виключило проникнення розплаву в середину. Завдяки цьому пристрою 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 у порівнянні з атмосферним тиском. На вилівку після охолодження сформувалась утяжина у верхній частині, що також підтверджує факт розрідження в усадковій раковині.

Тому автор запропонував скорегувати в ДСТУ 9051:2020 (Виливки з чавуну і сталі. Дефекти. Терміни та визначення) визначення дефекту 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 вилівку з меншою міцністю». Рекомендацію автора прийнято до впровадження Технічним комітетом стандартизації 177 «Ливарне виробництво» (акт від 24.04.2023 р.).

На прикладі виготовлення художнього вилівка "Буйвол" запропонована нова методика усунення утяжини, яка полягає у з'єднанні усадкової порожнини з атмосферою навколишнього середовища. Завдяки цьому в термічному вузлі розрідження не виникає, що запобігає формуванню утяжини. В новій розробці автор враховував, що усадкові раковини і пористість в середині вилівка не контролюються на відміну від високих вимог до точності форми поверхонь художніх литих виробів.

Для цього автор встановлював голку медичну трубчасту із аустенітної неіржавіючої сталі із зовнішнім діаметром 0,80 мм і отвором діаметром 0,49мм в прес-формі одним кінцем в центрі термічного вузлу потовщеної частини вилівка, а другим – в ливарній формі з боку не робочої поверхні, яка недоступна для огляду і з'єднується з атмосферним повітрям. Крім того, зменшено витрати на литникову систему за рахунок усунення масивного центрального живильника, який раніше підводили в тепловий вузол, і карбування поверхні художнього вилівка. По результатам експериментальних досліджень автор отримав патент України № 127278 на «Спосіб усунення утяжин у вилівках з потовщеними частинами стінки».

Наукові результати дисертації

1. Вперше теоретично визначено вплив хімічного складу залізовуглецевих сплавів у діапазоні 0,04...4,83 %C на кінетику просування фронтів твердіння вилівання, солідус і ліквідус у циліндричних вилівках за параметричним критерієм τ/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 залізобуглецевих 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 унеможлилювало точний розрахунок маси графітуючого модифікатора, а розміщення алюмінію в нижній частині виливка 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 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 виливка і з'єднують з атмосферою.

Практична значимість:

1. Розроблено рекомендації по підвищенню експлуатаційних властивостей чавунних прокатних валків за рахунок графітуючого модифікування рідкої та рідко-твердої зон виливка 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 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 вилівка, яка утворилася внаслідок зсідання металу під час твердіння" на скорегований за результатами роботи: "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" (акт від 24.04.2023 р. Технічного комітету стандартизації 177 «Ливарне виробництво»). Акти впровадження наведені у Додатку В (стор. 156) та Додатку Г (стор. 157).

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 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.

Зауваження по дисертаційній роботі

По дисертаційній роботі можна зробити наступні зауваження:

1. На стор. 41, рис. 1.7 наведено вплив вмісту вуглецю на процес затвердіння фронту виливання. Проте, не пояснюється мінімум тривалості твердіння при вмісті вуглецю $\approx 0,40\% - 0,45\%$.

2. В розділі 3, стор. 112, рис. 3.3, 3.4 наведено приклади утворення утяжин на торцях надливів чавунних прокатних валків після електрошлакового обігріву. Проте, цей дефект не є ознакою браку для даної категорії виливків, тому що надлив із дефектом відрізають і відправляють в шихту на переплав.

3. На стор. 120, рис. 3.8 U-подібний манометр зафіксував початок розрідження на 10с, а закінчення зміни різниці висоти водяних стовпів становить 470с. Однак, автор не пояснює таку ранню появу розрідження в центрі теплового вузла.

4. У рукопису дисертації зустрічаються орфографічні та стилістичні помилки, наприклад, на стор. 77, останній абзац: «нижньї шийки», а потрібно нижньої шийки; на стор. 113, перший абзац: «Це дозволила», а потрібно «Це дозволило»; стор. 118, рис. 3.7 «U-образний манометр водяний», а потрібно «U-подібний манометр водяний»

Однак, зроблені зауваження не знижують загальної позитивної оцінки дисертації.

Загальний висновок та оцінка роботи

Дисертаційна робота Семенова Олександра Дмитровича на тему «Встановлення кінетики формування рідко-твердої та твердо-рідкої зон у виливках із залізобуглецевих 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 опонент:

проректор з науково-педагогічної роботи

та міжнародної діяльності

Національного університету

«Запорізька політехніка»

доктор технічних наук, професор



Валерій НАУМИК