

ВІДГУК
офіційного опонента на дисертаційну роботу
Донія Олександра Миколайовича
«Комп'ютерні моделі для вивчення процесів формування структури у ливарних
алюмінієвих сплавах при їх кристалізації»,
яка подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.16.04 – «Ливарне виробництво».

1. Актуальність теми

Всебічне забезпечення одержання виливків високої якості з різноманітних сплавів потребує рішення цілого комплексу питань, до найбільш важливих з яких відносяться, в тому числі, дослідження з теорії кристалізації і структуроутворення сплавів.

На теперішній час розроблені математичні моделі, що дозволяють розраховувати теплопередачу при формуванні виливків, швидкість переміщення фронту кристалізації тощо. Однак існуючі моделі не дозволяють досить точно описати процес утворення структури литого металу. Математичний опис таких процесів вельми складний, тому застосування методів імітаційного моделювання та створення комп'ютерних моделей дозволить досліджувати особливості процесів структуроутворення у виливках при кристалізації та, в результаті, удосконалювати ливарні технології.

Дослідження впливу теплофізичних дій на процеси утворення кристалів та на їх подальше зростання в сплавах, які твердіють при різних умовах охолодження, є вельми важливими, зважаючи на те, що сучасні уявлення про зародження і зростання твердої фази здебільшого ґрунтуються на положеннях рівноважної термодинаміки і не враховують умов кристалізації сплавів в реальних ливарних процесах. Окрім того, для одержання виливків із заданими характеристиками необхідно здійснювати своєчасний контроль стану рідкого металу (температура, наявність в ньому модифікатора, умови охолодження сплаву та ін.). Використання для контролю за станом розплаву термічного аналізу, який ґрунтується на реєстрації типових ефектів твердіння сплавів, є перспективним, зважаючи на те, що існують математичні моделі, які зв'язують зміни температури сплаву при твердінні сплаву з процесами кристалізації та формуванням структури у виливках.

Тому дисертаційна робота, що спрямована на розробку наукових принципів створення комп'ютерних моделей кристалізації та комп'ютерного термічного аналізу сплавів для дослідження і визначення оптимальних технологічних режимів одержання виливків із заданими властивостями, є актуальною.

Дисертаційну роботу виконано в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (НТУУ «КПІ») в рамках планів робіт НДЛ «Керування якістю рідких металів і сплавів» кафедри «Металознавства і термічної обробки металів» інженерно-фізичного факультету НТУУ «КПІ» відповідно до програм Міністерства освіти і науки України: «Моделювання фазових перетворень при кристалізації і термічній обробці евтектичних структур та розробка композиційних матеріалів для вузлів тертя» (№ державної реєстрації ДР 0100U000871, 2001 - 2002 р.); «Розробка методології технологічного передбачення структуроутворення у функціональних матеріалах для забезпечення якості металовиробів» (№ ДР 0103U000222, 2003 - 2005 р.); «Наукові і технологічні ос-

нови управління структурою та властивостями ливарних багатокомпонентних сплавів системи Al-Mg» (№ ДР 0109U000660, 2009 - 2011 р.); «Розробка наукових принципів управління фазово-структурним складом та властивостями вторинних ливарних алюмінієвих сплавів» (№ ДР 0106U002326, 2010 - 2012 р.); «Комп'ютерне моделювання та оптимізація технологічних процесів лиття та термічної обробки» (№ ДР 0119U103606, 2019 - 2020 р.); Ініціативна фундаментальна робота «Дослідження і моделювання фазових перетворень та зміни електронної структури, її впливу на формування нових та модифікацію наявних властивостей матеріалів», 2013 - 2017 р.).

2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій

Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків (по розділах та загальних), списку використаних джерел з 287 найменувань та 8 додатків. Робота викладена на 392 сторінках (з яких обсяг тексту становить 223 сторінки), містить 83 рисунки та 19 таблиць.

Дисертаційну роботу написано грамотно, застосована в роботі наукова термінологія є загально визнаною, стиль викладення результатів теоретичних і практичних досліджень, нових наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечує достатній рівень доступності їх сприйняття та використання.

Автореферат відповідає змісту дисертаційної роботи, написаний грамотно та з використанням сучасної наукової термінології і не містить наукових висновків, які відсутні в дисертації. Оформлення дисертаційної роботи та автореферату в цілому відповідає вимогам державних стандартів і МОН України.

В **першому розділі** розглянуті основні чинники, що впливають на процеси формування первинної структури у сплавах, які забезпечують високу якість литих заготовок. Показано, що для забезпечення спрямованого керування структурно-міцнісними характеристиками литих виробів безпосередньо в процесі їх виготовлення найбільш доцільно використовувати метод термічного аналізу, який дозволяє фіксувати динаміку процесу їх кристалізації. Проаналізовано існуючі системи контролю стану рідкого металу та прогнозу заданих структури і властивостей металів у закристалізованих сплавах, які побудовані на основі термічного аналізу. Наведена узагальнена блок-схема таких систем, що складається із трьох основних блоків: відбірник проб металу із первинним датчиком, аналого-цифровий перетворювач (АЦП) і електронно обчислювальна машина (ЕОМ - комп'ютер). АЦП перетворює аналоговий сигнал з термопар у дискретний, який обробляється в ЕОМ. Розглянута можливість розробки термошумового датчика температури, в основу якого покладено закон Найквіста.

Проведено аналіз методів дослідження процесу кристалізації (як експериментальних, так і теоретичних). Зроблено висновок про перспективність використання для цього імітаційного моделювання та клітинних автоматів. Запропоновано співвідношення для оцінки критичного розміру зародка твердої фази на основі фізичних характеристик металу. Розглянуті математичні моделі кристалізації металів і сплавів, які розроблені на базі динамічної теорії твердіння металевих виливків, що використовуються для інтерпретації експериментальних даних і прогнозу структури та службових властивостей сплавів методом термічного аналізу. Такі моделі основані на рівнянні теплового балансу.

Зазначено, що поєднання способу експрес-аналізу стану металевих розплавів на базі термічного аналізу з підсистемою імітаційного моделювання кристалізації розплавів дозволило створити багатофункціональний інформаційно-технологічний комплекс для досліджень процесів твердіння металів і сплавів. Сформульовані задачі роботи.

У другому розділі проведено узагальнення принципів методики побудови підсистеми комп'ютерного термічного аналізу (КТА) для прогнозу стану металевих розплавів на основі алюмінію. Визначення необхідної точності вимірювання температури сплавів за допомогою комп'ютерного термічного аналізу базується на припущенні про те, що похибка визначення концентрації компоненту, в першу чергу, залежить від похибки виміру температури.

На підставі рівноважних діаграм стану ливарних сплавів на основі алюмінію, визначено необхідну точність вимірювання температури у підсистемі комп'ютерного термічного аналізу. Установлено, що абсолютна похибка вимірювання повинна бути не більшою, ніж 2,0 град. при роздільній здатності, не гіршій, ніж 0,3 град; частота дискретизації при реєстрації термограми визначається частотним складом термограм на ділянках з максимальним прискоренням зміни температури і, як визначено, повинна бути не меншою, ніж 3,0 Гц; частоту дискретизації можна довести до 20–30 Гц. При цьому, бажаним є одночасне застосування цифрового фільтра для частот вище 0,7 Гц. З'ясовано, що оптимальною геометричною формою пробовідбірників, що застосовуються у системах аналізу стану ливарних розплавів на основі термічного аналізу, є циліндр зі співвідношенням висоти і діаметра $G=h/d = 4-5$. При цьому, час охолодження проби металу фактично залежить тільки від діаметра d і майже не залежить від висоти h .

Установлено, що при використанні пробовідбірника, який заповнюється розплавом ззовні, перед заливкою, необхідно здійснювати його попередній розігрів.

Представлено розроблену математичну модель термошумового перетворювача, яка дає змогу здійснити оцінку чутливості та динамічного діапазону, розрахувати передаточну характеристику, а також параметри системи для заданого температурного впливу на вході. Розраховано максимальну потужність шумів на виході вимірювального контуру у разі оптимально підібраних параметрів вимірювальної котушки. Змакетовано конструкцію термошумового термометра і показано принципову можливість безконтактного вимірювання температури за його допомогою.

У третьому розділі наведено принципи математичної обробки кривих охолодження та розроблено математичні моделі, які застосовуються надалі в підсистемі КТА інформаційно-технологічного комплексу для прогнозування структури і властивостей у литих виробках. На основі динамічної теорії твердіння виливків розроблено математичні моделі процесу кристалізації металевої проби, особливістю яких є те, що градієнт температур по її об'єму не враховували.

Розглянуті математичні моделі, які пов'язують температуру проби металу з кількістю твердої фази у сплаві при кристалізації. Показано принципову можливість визначення кінетичних параметрів сплавів кристалізації по кривій охолодження (КО). Зроблено уточнення математичної моделі кристалізації чистого металу, яку можна використовувати і для чисто евтектичних сплавів:

Представлено розроблену математичну модель кристалізації сплавів, які утворюють твердий розчин. При цьому вводилось усереднене для ливарних алюмінієвих сплавів значення питомої теплоємності. Зміну прихованої теплоти кристалізації

сплаву при формуванні твердого розчину апроксимували прямолінійною залежністю.

Розроблено математичну модель процесу кристалізації сплавів з евтектикою при допущеннях, що фази у сплаві кристалізуються послідовно, тобто в момент закінчення кристалізації α -твердого розчину починає твердіти евтектика і що питомі теплоємності α -твердого розчину і евтектики, є рівними. Адекватність моделей перевіряли шляхом порівняння розрахованих значень L_1/c і L_2/c з табличними даними для сплавів Al-(6-8%)Si та Al-(10-12%)Si. Визначено, що похибка складає 10 – 12%. Таким чином, можна визначати відношення L_1/c і L_2/c та відносні кількості структурних складових в процесі кристалізації сплавів.

Представлено модифіковану методику, яка повинна сприяти підвищенню чутливості термічного аналізу, а саме визначенню часу та температури початку та кінця фазових перетворень ендо- або екзотермічних реакцій. Вона базується на підрахунку теплового балансу за кривою охолодження і моделює диференційний термічний аналіз. Ураховуючи специфіку цієї методики, що складається з комплексного використання ЕОМ та математичних моделей, введено термін «комп'ютерний термічний аналіз».

У четвертому розділі наведені результати випробування підсистеми КТА. Прогноз властивостей і управління процесом їх формування у сплавах з використанням КТА здійснюється за допомогою математичних моделей, які пов'язують параметри кристалізації, що визначаються по КО із службовими характеристиками сплавів. Ці моделі є регресійними рівняннями, які створені за експериментальними даними, одержаними за допомогою методу найменших квадратів, адекватність яких перевіряли по таблиці залишків. Представлені побудовані рівняння для визначення прогнозу тимчасового опору розриву і відносного подовження уздовж кривої охолодження для сплавів Al+Si та Al+Si+Mg (відповідно АК12 та АК7ч), в яких незалежними змінними обрані температура евтектичної рекалесценції та складові основних легуючих компонентів. Побудовані математичні моделі для визначення уздовж кривої охолодження відсоткового вмісту основних легуючих компонентів.

Показано, що за допомогою підсистеми КТА можна визначити вміст заліза в Al-Si і Al-Si-Mg ливарних сплавах. На першій похідній кривій охолодження фіксується пік, який відображає формування евтектики $\alpha+Al_3Fe$. Його виділення стало можливим тільки при застосуванні числового фільтру для обробки первинних експериментальних даних. Зазначено, що цей локальний максимум не виявляється при вмісті Fe $\leq 0,60$ %, починає формуватися при вмісті Fe $> 0,60$ %, а при Fe $\geq 0,70$ % цей пік досягає своєї найбільшої амплітуди і надійно визначається в автоматичному режимі підсистемою комп'ютерного термічного аналізу.

На прикладі впливу стронцію на криві охолодження і їх перші похідні за часом, показано можливість підсистеми комп'ютерного термічного аналізу для оцінки ступеня модифікованості ливарних алюмінієвих сплавів Al+9,0-12,0%Si та Al+7,0-8,0%Si+0,4-0,5%Mg. Визначено два параметри, які можна використовувати для оцінки ступеня модифікованості зазначених сплавів. Це інтервал між числовими значеннями немодифікованого і модифікованого розплавів DT_s та величина рекалесценції DT_{ep} в області початку формування евтектики (або величина другого піку першої похідної кривої охолодження). Для них запропоновані умовні бали (Bl) і створені відповідні регресійні рівняння.

Запропоновано загальний алгоритм оцінки ступеня модифікованості розплавів на прикладі сплаву Al+9,0-12,0%Si.

Для збільшення точності та надійності прогнозу рівня службових властивостей сплавів у литому стані, запропоновано класифікатор кривих охолодження, який складається з чотирнадцяти типів або класів термограм. Класифікація здійснюється за рекалещенціями температур, які можуть існувати на початку формування тих або інших структур. Два класи відповідають чистому металу або винятково евтектичному складу. Для бінарного сплаву за наявності однієї евтектики, кількість можливих типів – чотири. Для більш складного сплаву, який складається з твердого розчину та двох евтектик, теоретично можна передбачити існування восьми варіантів або типів кривих.

На прикладі технологічного процесу плавки і розливання Al-Si сплавів, розроблено пропозицію включення підсистеми КТА у традиційну технологію, яка обговорена нормативними документами. Зроблено це так, щоб доповнити її новими функціями, які надає підсистема і, при цьому, не порушити основні технологічні операції.

У п'ятому розділі приведена розроблена клітино-автоматна математична модель формування структури твердого металу та її алгоритмічна реалізація. Робота цього кліткового автомату підпорядковується зовнішнім умовам охолодження та взаємодії елементів між собою за аналогією із появою центрів кристалізації та їх подальшим зростанням. Сформульовано математичні задачі теплопровідності та дифузії, які задіяні в імітаційній моделі кристалізації та які дають змогу визначити наявність і величину переохолодження у довільній точці розплаву. Вибрано і реалізовано чисельні схеми для розв'язку двовимірної задачі теплопровідності, з урахуванням виділення теплоти кристалізації та двовимірної задачі дифузії. Розроблено оригінальний алгоритм розрахунків перерозподілу другого компонента у розплаві після розподільчої дифузії, з урахуванням наявності вкраплень твердої фази.

Представлений розроблений інтерфейс комп'ютерної реалізації імітаційної моделі, який дає змогу вводити параметри моделі і реєструвати результати моделювання візуально та у вигляді файлів. Вихідною інформацією є: файли, в яких фіксується температура у центральній точці на кожному кроці розрахунків, переохолодження розплаву, кількість центрів кристалізації, що з'являються у процесі твердіння, швидкість утворення центрів кристалізації під час процесу твердіння, кількість твердої фази у процесі кристалізації, швидкість зростання кількості твердої фази під час процесу кристалізації; зображення структури твердого металу, що моделюється клітковим автоматом в кольоровому та в чорно-білому варіанті; розподіл другого компоненту уздовж перетину системи; величина градієнту температури уздовж перетину системи під час кристалізації.

На прикладі кристалізації чистого алюмінію, приведені дані, що доводять адекватність імітаційної моделі утворення структури при кристалізації, шляхом порівняння розрахованих макроструктур твердого металу із тими, які формуються у реальному експерименті. Показано, що варіювання умовами кристалізації та її параметрами призводить до відповідних змін структури твердого металу.

У шостому розділі представлена розроблена методика налаштування імітаційної моделі формування структури при кристалізації та результати дослідження процесів структуроутворення у сплавах при їх кристалізації за допомогою імітаційного моделювання. Процес налаштування моделі складається з трьох етапів і базується на порівнянні результатів моделювання з реальними результатами експерименту. На першому етапі на початковій ділянці кривої охолодження підбираються ко-

ефіцієнти тепловіддачі у такий спосіб, щоб швидкість охолодження в моделі відповідала експериментальній. На другому етапі підбирається тривалість процесу кристалізації, яка регулюється коефіцієнтом адаптації. І на третьому етапі досягається збіг змодельованої структури металу із реальною шляхом регулювання інтервалу метастабільності для утворення центрів кристалізації та інтервалу метастабільності для швидкості росту кристалів.

Приведені результати комп'ютерного експерименту щодо впливу швидкості охолодження на кінетику утворення центрів твердої фази чистого алюмінію при гомогенній кристалізації. Показано, що при повільному охолодженні ($V_{ox} = 0,00025$ град/с) змодельована крива охолодження має ділянку переохолодження із рекалесценцію температури, яка з'являється за абсолютної відсутності домішок. Такий стрибок при появі центрів кристалізації, на думку автора, свідчить, що, незважаючи на майже рівноважні умови охолодження, стан рідкого металу нижче температури кристалізації є нестабільним, і температурна точка початку кристалізації є точкою біфуркації.

Представлені результати комп'ютерного експерименту щодо дослідження впливу швидкості охолодження на кінетику утворення центрів твердої фази чистого алюмінію при гомогенній кристалізації показали, що при невисоких швидкостях охолодження залежність кількості утворених центрів кристалізації від часу $N = f(t)$ є стрибкоподібною, а швидкість їх утворення має один екстремум. Усі осередки твердої фази з'являються за короткий інтервал часу – 0,3 с. Структура твердого металу, при цьому, складається із великих майже не орієнтованих зерен. Збільшення швидкості охолодження призводить до появи «сходинок» на кривій $N = f(t)$, а швидкість появи центрів кристалізації має вже декілька піків. Тобто центри кристалізації виникають стрибкоподібно на різних етапах процесу з розривами у часі. Подальше зростання швидкості охолодження призводить до появи багатьох «сходинок». На залежності швидкості утворення зародків кількість піків зростає і процес утворення центрів кристалізації стає майже періодичним. Структура твердого металу стає тризонною, а потім різнозернистою.

За результатами комп'ютерного експерименту з допомогою імітаційної моделі кристалізації доведена адекватність запропонованої формули критичного радіусу зародка твердої фази при гомогенній кристалізації, в якій критичний радіус зародка визначається через теплофізичні характеристики металу: коефіцієнт теплопровідності, питому теплоємність, густину і швидкість охолодження при кристалізації.

Показано, що за наявності модифікатора, гомогенне утворення центрів кристалізації в чистому алюмінії стає можливим при швидкості охолодження від 5,00 град/с і вище. Вони починають з'являтися в невеликій кількості в кінці кристалізації. Результати моделювання засвідчили, що в рідкому алюмінії за відсутність модифікатора, кристали утворюються біля стінок форми незалежно від швидкості охолодження. Введення модифікатора призводить до об'ємного характеру кристалізації. У твердому стані спостерігається зменшення розміру зерен при збільшенні V_{ox} .

Приведені дані щодо впливу швидкості охолодження на кінетику утворення осередків твердої фази сплаву Al-8,2%Si при гомогенній кристалізації за результатами комп'ютерного експерименту. Показано, що форма кривих залежності $N = f_1(t)$ не змінюється зі зміною швидкості охолодження. Центри кристалізації утворюються у два етапи: перший відповідає утворенню твердого розчину, а другий – формуванню евтектики. Установлено, що всі зародки при утворенні твердого розчину,

з'явилися за короткий інтервал часу. На думку автора, такий стрибок при появі центрів кристалізації є аналогічним процесу їх появи при кристалізації чистого алюмінію і свідчить, що цей процес нестійкий у момент початку кристалізації незалежно від швидкості охолодження.

Показано, що при швидкостях охолодження 5,00 град/с та 6,67 град/с, центри кристалізації сплаву Al-3,8%Cu при гомогенній кристалізації утворюються у два етапи: перший відповідає утворенню твердого розчину на початку кристалізації, а наприкінці кристалізації зародки твердої фази починають знову з'являтися і утворюють в рідко-твердому стані зерна твердого розчину попереду фронту кристалізації з прошарком рідини. Також показано, що в процесі кристалізації сплавів можуть виникати умови формування несучільної зони переохолодження складної форми з окремими ділянками у центрі системи.

Виходячи з отриманих здобувачем наукових та практичних результатів, використаних методів та методик досліджень, методів обробки даних, використаних приладів та апаратури, вважаю ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій цілком прийнятною.

Загальні висновки по дисертації відображують одержані автором результати, розкривають наукові та практичні досягнення.

У додатках наведені документи щодо промислових випробувань та впровадження результатів дисертації у вигляді: актів промислових випробувань підсистеми комп'ютерного термічного аналізу на ВАТ «Артемаш» (м. Київ), ДП «ЛК-Металургія» (м. Київ), акту випробувань підсистеми імітаційного моделювання процесу формування структури при кристалізації металів і сплавів та акту впровадження результатів наукової роботи в навчальний процес в сумському державному університеті, методичних матеріалів для навчального процесу в НТУУ «КПІ».

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі висока оскільки:

- базується на комплексному критичному аналізі наявного в літературних та інформаційних джерелах матеріалу за даною проблемою;
- реалізує класичний підхід до наукового дослідження, який включає в себе: постановку мети, визначення завдань досліджень (вступ); аналіз сучасних уявлень про формування структури сплавів під час кристалізації та методів контролю і прогнозування властивостей металів у твердому стані (розділ перший); застосування сучасних методів, обладнання, приладів при створенні апаратної підсистеми комп'ютерного термічного аналізу для контролю стану ливарних розплавів сплавів на основі алюмінію (розділ другий, п'ятий, шостий);
- використовуються сучасні методи і методики дослідження та обробки даних, створено оригінальні математичні моделі для відповідної обробки кривих охолодження, оцінки стану ливарних розплавів із застосуванням підсистеми термічного аналізу, імітаційного моделювання процесу утворення структури при кристалізації, комп'ютерного моделювання кристалізації металів і сплавів.

3. Достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій

Достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій дисертаційного дослідження забезпечується:

- коректною постановкою завдань теоретичних та експериментальних досліджень, системністю вивчення та логікою аналізу досліджуваних процесів, відсутністю протиріч щодо сутності фізико-хімічних явищ які досліджуються в роботі;

- достатньою збіжністю аналітичних та експериментальних досліджень; достатньою кількістю публікацій у виданнях, що входять до переліку фахових видань з технічних наук в Україні, визнанням отриманих результатів на міжнародних конференціях, публікацій в виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз даних, дослідно-промисловою перевіркою і застосуванням на підприємствах на ВАТ «Артемаш» (м. Київ), ДП «ЛК-Металургія» (м. Київ), в сумському державному університеті, в НТУУ «КПІ», що підтверджено відповідними документами;

- одержаними розрахунковими та експериментальними даними, встановленими закономірностями, розробленими математичними моделями з використанням фундаментальних положень теорії кристалізації, основних положень теорії і практики ливарного виробництва, матеріалознавства, теорії експерименту, математичного моделювання;

- застосуванням сучасних методів проведення технологічних вимірювань, стандартних методів і апаратури, яка пройшла державну повірку, застосуванням спеціальних комп'ютерних програм для обробки результатів експериментальних досліджень.

Всі висновки дисертаційної роботи базуються на отриманих автором теоретичних і експериментальних результатах, які між собою співпадають. Представлені положення, висновки та рекомендації не суперечать існуючій на даний час системі знань у даній галузі науки і тому я вважаю їх достовірними.

4. Новизна наукових положень, висновків та рекомендацій

Проаналізувавши основні результати досліджень, що приведені в дисертаційній роботі Донія О.М., можна виділити наступні положення наукової новизни:

1. Вперше за результатами аналізу математичних рівнянь, які описують переміщення фронту кристалізації та розповсюдження хвилі переключень в двовимірному клітинному автоматі, встановлено залежність критичного розміру зародка при кристалізації металів від теплопровідності, питомої теплоємності, густини та швидкості охолодження розплаву.

2. Вперше розроблені наукові принципи створення комп'ютерних моделей кристалізації як чистих металів, так і бінарних сплавів систем евтектичного типу. Зазначені принципи базуються на поєднанні застосування кліткових автоматів з математичними моделями теплопередачі та дифузії і дозволяють в обчислювальному експерименті спостерігати за структуроутворенням, а також досліджувати динаміку утворення центрів кристалізації металу у рідкому, а також у твердо-рідкому станах за різних умов охолодження.

3. Вперше на прикладі чистого алюмінію, а також сплавів Al + 8,2 % Si та Al + 3,8 % Cu за допомогою комп'ютерної моделі кристалізації металів встановлено вплив швидкості охолодження на закономірності та динаміку утворення центрів кристалізації.

4. Отримала подальший розвиток динамічна теорія кристалізації металевих сплавів внаслідок уточнення формул розрахунку за кривою охолодження кількості твердої фази і швидкості її росту, а також створена математична модель кристалізації бінарного сплаву.

5. Вперше доведена можливість створення безконтактного індуктивного термошумового перетворювача для вимірювання температури металів в рідкому та твердому станах.

5. Цінність результатів для науки та практики

Наукове значення дисертаційної роботи полягає в створенні наукових основ і розробленні математичних моделей кристалізації ливарних алюмінієвих сплавів, в яких зміна температури сплаву при твердінні достатньо корелюється з адекватним відтворенням процесу структуроутворення у відповідному термочасовому проміжку.

Практичне значення роботи полягає у рішенні важливої проблеми розробки інформаційно-технологічного комплексу прогнозування структури і властивостей литих деталей, який складається з системи імітаційного моделювання процесу кристалізації сплавів та комп'ютерного термічного аналізу. Запропонований метод визначення режимів процесу твердіння виливків з використанням аналізу структуроутворення в них та комп'ютерної моделі кристалізації сплавів в рамках обчислювального експерименту дає змогу раціонально впливати на структуру виливків шляхом зміни технологічних режимів і керуючих впливів на сплави. Створений пакет прикладних програм для ЕОМ на основі розробленої методики, яка використовується в навчальному процесі студентами ЗВО при виконанні лабораторних та курсових робіт за дисциплінами, що пов'язані з процесами кристалізації металів та сплавів. Для виробничих умов рекомендовано доповнити засоби контролю за процесами плавлення і формування виливків із Al-Si сплавів створеним інформаційно-технологічним комплексом. Всі ці розробки успішно пройшли дослідно-промислову перевірку, про що свідчать відповідні акти.

6. Повнота відображення в опублікованих роботах наукових положень, висновків та результатів

За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 49 наукових праць, з них 32 статі у наукових виданнях (з них 20 у наукових фахових виданнях України, 10 статей у виданнях іноземних держав, 7 статей у виданнях, які включені до міжнародної наукометричної бази Skopus, 6 включені до міжнародної наукометричної бази Web of Science, 17 статей у виданнях, які включені до міжнародної наукометричної бази Google Scholar), 1 препринт.

Апробацію результатів дисертації проведено на 16 міжнародних та республіканських науково-технічних конференціях за фахом. Особистий внесок здобувача відзначено в дисертації і авторефераті щодо публікацій, написаних у співавторстві.

Вказані публікації, в цілому, відображають основний зміст дисертації, об'єм та характер проведених теоретичних та практичних досліджень.

Автореферат ідентичний за змістом з основними положеннями дисертації і достатньо повно відображає її основні наукові результати, що отримані здобувачем.

7. Рекомендації по використанню результатів дисертації

Враховуючи наукову та практичну значимість дисертації О.М. Донія, вважаю за необхідне рекомендувати результати дисертації, насамперед, до впровадження на підприємствах, де представлені розробки вже пройшли попередню апробацію (ВАТ «Артемаш», ДП «ЛК-Металургія»), а також на інших профільних підприємствах,

що займаються виробництвом литих заготовок із алюмінієвих сплавів. Окрім того, практика використання в навчальному процесі створеного пакету прикладних програм для ЕОМ на основі розробленої автором методики в сумському державному університеті та в НТУУ «КПІ» може бути широко розповсюджена на інші ЗВО. Результати досліджень, що представлені в дисертації, можуть бути використані також науковими працівниками, які займаються проблемами за профілем даної роботи, а також при удосконаленні технологічних процесів спеціальних способів лиття.

8. Загальні зауваження по роботі

Не дивлячись на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи Донія О.М., є декілька недоліків, по яких можуть бути сформульовані наступні зауваження:

1. В п.п. 1.5 «Математичне моделювання процесів кристалізації» автор перелічує відомі методи розрахунку (зокрема, відому задачу Стефана) саме процесу затвердіння, що дозволяють за своїм вихідним призначенням розрахувати з певною точністю динаміку утворення твердої фази і ніяким чином не відображають процес структуроутворення, а це різні речі. Окрім того, автором вживається термин «фронт кристалізації», що не є коректним у фізичному сенсі, тому що слово «кристалізація» більше відноситься, так би мовити, до температурних та концентраційних характеристик стану сплаву (наприклад, кристалізація евтектичного типу), ніж до просторових, на відміну від затвердіння.

2. На рис. 2.3 та 2.4 представлені конструкції пробовідбірників для проведення термічного аналізу сплавів. Якщо один з варіантів конструкції пробовідбірника не передбачає контрольованого термостатування, то загальний тепловміст металу в пробовідбірнику буде замалим для отримання адекватної кривої охолодження наявними технічними засобами. Окрім того, не вказані певні експлуатаційні характеристики пробовідбірника, зокрема, чи є він багаторазовим, що суттєво впливатиме на вартість досліджень.

3. Розрахунки за рівнянням (3.48) дають від'ємні значення питомої теплоти кристалізації для сплавів на основі алюмінію в інтервалі температур затвердіння.

4. Для оцінки ступеня модифікованості алюмінієвих ливарних сплавів з використанням комп'ютерного термічного аналізу (п.п. 4.3) в якості модифікатора обрана лігатура Al-Sr, а в п.п. 5.5, на стор. 262 мова йде про наявність модифікатора у вигляді «...твердих частинок, які є запалами кристалізації, в об'ємі рідкого металу.» Відомо, що модифікатори першого та другого роду діють за різними механізмами і забезпечують, в тому числі, різну тривалість ефекту модифікування. Яким чином це враховано в запропонованому інформаційно-технологічному комплексі?

5. На стор. 223 (перший абзац зверху) стверджується, що для опису ліній діаграм стану подвійних сплавів з евтектикою можна використовувати лінійну апроксимацію у вигляді рівняння прямої, що проходить через дві точки, при цьому не приведені показники достовірності апроксимації для жодної лінії діаграми, зокрема лінії ліквідус, а на стор.224 (третьій абзац зверху) написано, що помилками при лінійній апроксимації ліній ліквідус, можна знехтувати «Згідно з досвідом розрахунків, які виконував автор у різноманітних дослідженнях...» - це не зовсім коректно.

6. На рис. 5.12 та 6.5 приведені порівняння змодельованої та реальної структури сплаву, однак не зрозумілим є масштаб зображень, а також немає інформації щодо кількісної металографії для співставлення з отриманими результатами моделювання.

7. Не дуже доречною з практичної точки зору представляється постановка питання щодо модифікування чистого алюмінію, цінність якого саме полягає у відсутності будь яких домішок.

8. В роботі відсутнє доведення стійкості отриманих розв'язків та немає чіткого визначення меж застосування запропонованих моделей утворення мікроструктури.

9. Значну кількість літературних джерел, на які автор посилається в дисертації, опубліковано понад десять років тому.

10. На жаль, оригінальні розробки, що представлені в дисертаційній роботі, не захищені патентами або свідоцтвами про авторське право.

11. В тексті дисертації присутні вади оформлення, зокрема, на стор. 308 два рази повторюється текст другого абзацу зверху, є помилка у назві підпункту на стор. 305, на стор. 217 розмірність коефіцієнту теплопровідності приведена з помилкою.

Деякі з наведених зауважень носять рекомендаційний характер для використання в подальшій роботі.

9. Оцінка дисертації в цілому

В цілому дисертаційна робота Донія Олександра Миколайовича «Комп'ютерні моделі для вивчення процесів формування структури у ливарних алюмінієвих сплавах при їх кристалізації» становить собою самостійний завершений науковий труд та відповідає паспорту спеціальності 05.16.04 – «Ливарне виробництво».

Дисертаційна робота містить раніш не захищені наукові положення і одержані автором нові науково обгрунтовані результати, що в сукупності вирішують важливу науково-прикладну проблему створення наукових основ і розроблення математичних та комп'ютерних моделей кристалізації алюмінієвих ливарних сплавів з метою управління структурою і властивостями литого металу.

Відмічені недоліки роботи не мають вирішального значення щодо формулювання наукової новизни.

Виконана дисертаційна робота повною мірою відповідає вимогам п. 9,10 "Порядку присудження наукових ступенів" щодо докторських дисертацій, а її автор, Доній Олександр Миколайович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.16.04 -«Ливарне виробництво».

Офіційний опонент

Декан електрометалургійного факультету
Національної металургійної академії України,
доктор технічних наук, професор

 Вадим Селівьорстов

Підпис В.Ю. Селівьорстова засвідчую.

Секретар Вченої Ради



Олег Потап