

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу

Чистякова Олега Валерійовича

**«Вплив пружних коливань і термочасової обробки на процеси
кристалізації в металевих системах»,**

яка представлена на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю **136 «Металургія»**,
галузь знань **13 «Механічна інженерія»**

Актуальність теми дисертації

Одним із ключових фізичних явищ, яке зумовлює формування виробів у ливарному виробництві, є кристалізація. Перехід із рідкого стану в твердий супроводжується низкою процесів, які зумовлюють формування різного типу кристалічних структур. Сплав одного і того ж хімічного складу, виплавлений в однакових умовах, на етапі кристалізації може формувати абсолютно різні види структур, що значною мірою позначається на механічних властивостях виробів. Керування процесами структуроутворення є важливим, але дуже непростим завданням.

Моделювання ливарних процесів є важливим і дієвим механізмом наукового дослідження. Зважаючи на те, що процеси кристалізації литих деталей відбуваються у замкнених ливарних формах, можливості спостерігати напряму за ними немає. Тому заміна металевих матеріалів на прозорі органічні сполуки для візуального дослідження динаміки кристалізації є вдалим технічним рішенням.

Вплив зовнішніх фізичних факторів – таких як пружні коливання, ультразвукові коливання тощо – почали досліджувати досить давно, про що свідчить огляд літературних джерел. Однак чітких закономірностей, які можна використовувати як технологічні рекомендації для практичного використання, на сьогодні встановлено не було. Іншим фактором є тепловий режим, тобто величина перегрівання та швидкість охолодження під час кристалізації. Ці питання набагато більше вивчені, але автор дисертації знайшов важливі моменти, які підлягають уточненню, що і стало одним із поставлених у роботі завдань.

Зважаючи на те, що робота поєднує в собі теорію ливарних процесів, фізичне моделювання, а також передбачає вперше виконати дослідження впливу зовнішніх фізичних факторів на металеві та неметалеві розплави, робота є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами

Дисертаційну роботу виконано в Фізико-технологічному інституті металів та сплавів НАН України в рамках вітчизняного проєкту «Розроблення науково обґрунтованих прийомів управління процесами кристалізації металевих систем з використанням термосилових дій на рідкий метал та при його твердненні» (номер державної реєстрації 0124U001530), а також у рамках спільного проєкту НАН України та академії наук Республіки Польща (Університет науки та технологій, м. Краків).

Ступінь обґрунтованості та достовірності результатів

Автор дисертації достатньо повною мірою наводить опис методик експерименту. Використання стандартних одиниць вимірювання, відомого та верифікованого лабораторно-вимірювального обладнання, повторюваність експериментів забезпечують належний рівень достовірності. Більшість результатів і сформульованих висновків (за виключенням деяких позицій наукової новизни, де показано дійсно оригінальні дані) не йдуть у розріз із сформованими раніше уявленнями про закономірності і динаміку процесів кристалізації.

Особливо вдалою є ідея «масштабування» фізичних експериментів, коли результати, отримані на малих об'єктах, автор переносить на великі. При цьому запропоновано використовувати певні коефіцієнти, сутність яких прозоро пояснено, тому достовірність отриманих результатів не викликає сумнівів.

Дослідження є цілісним і логічно завершеним, оскільки після отримання стабільних результатів моделювання на неметалевих прозорих органічних сполуках автор реалізував дослідження на ливарних сплавах. При цьому показано, що механізми впливу на процеси кристалізації є ефективними як для алюмінієвих сплавів (на прикладі одного із них), так і для залізвуглецевих (на прикладі легованої сталі).

Для реалізації фізичних експериментів автор дисертації особисто змодельовав і виготовив досить складні лабораторні установки, а також спеціальне оснащення, яке забезпечило отримання стабільних результатів.

Крім цього, викладення матеріалів дисертації у провідних фахових виданнях та апробація на міжнародних конференціях свідчать про високий рівень достовірності та обґрунтованості наукових результатів.

Повнота викладення результатів дисертації в опублікованих працях

Загальна кількість опублікованих праць становить 23 позиції. Відповідно до сучасних тенденцій розширення аудиторії представлення наукових результатів, 2 статті опубліковано у журналах, які входять до наукометричних баз, зокрема Scopus), ще 6 статей викладено у фахових виданнях України категорії Б. Крім цього, опубліковано 11 тез доповідей на наукових конференціях. Результати дисертації досить повною мірою відображено у публікаціях.

Загальна характеристика роботи

Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 155 найменувань. Загальний обсяг дисертації становить 179 сторінок.

У вступі наведено загальну характеристику дисертаційної роботи. Сформульовано актуальність, вказано зв'язки роботи з науковими проектами, вказано об'єкт, предмет і методи досліджень. Сформульовано пункти наукової новизни, охарактеризовано практичне значення результатів роботи. Наведено інформацію щодо повноти викладення результатів у наукометричних та фахових виданнях, вказано конференції, в яких брав участь автор.

У першому розділі проведено критичний аналіз першоджерел, які висвітлюють такі теми як загальні особливості гомогенної та гетерогенної кристалізації металевих розплавів, а також вплив зовнішніх фізичних полів (мехінічних, ультразвукових, електромагнітних) на динаміку процесів кристалізації. В результаті проведеного огляду автор встановив ті питання, які досліджено недостатньою мірою або ж дослідження яких ще не було проведено. В цілому показано перспективність використання зовнішніх фізичних факторів для впливу на структуроутворення металів. Це призвело до логічного формулювання мети дослідження і постановки переліку завдань.

У другому розділі наведено інформацію щодо використаних матеріалів, вимірювального обладнання та методів проведення експериментів. Цей розділ виглядає досить потужним, оскільки тут представлено оригінальні авторські установки, які можна вважати окремими винаходами і які дуже посирили якість виконаної роботи в подальшому. Тут же пояснюється сутність фізичного моделювання і доцільність використання цього методу в експериментах.

Наведені формули (2.1) – (2.5), які пояснюють критерії подібності систем, забезпечують належний рівень розуміння того, яким чином отримані на

фізичних моделях результати, де не використано рідкий метал, можна достовірно перенести і застосувати для металевих систем. Тут для досліджень вибрано низькотемпературні матеріали: сплав Вуда, сплав Розе, дифеніламін, циклогексанол та салол.

Зміст цього розділу свідчить про значну обізнаність автора дисертації в галузі конструювання дослідних установок та забезпечення адекватності і достовірності отриманих результатів.

У третьому розділі викладено результати експериментів щодо фізичного моделювання виключно із низькотемпературними матеріалами. В результаті дослідження впливу перегрівання на переохолодження під час кристалізації автор дійшов висновків, які добре узгоджуються із загальновідомими результатами. При цьому відмічається, що процеси кристалізації в реальних системах практично завжди мають гетерогенний характер, а вирішальну роль в цьому плані грають домішки, наявні у розплаві. Досліджено динаміку процесу зародкоутворення і встановлено деякі раніше не відомі залежності, які описують вплив на цей процес зовнішніх факторів.

В цьому розділі також реалізовано масштабний фактор, який дає змогу порівнювати малі та великі об'єкти, тобто перекладати результати, отримані в результаті моделювання, на реальні металеві системи. Крім цього, враховано й інші критерії подібності, серед яких найбільш слід виділити коректність врахування температурного фактора.

Також досліджено вплив пружних коливань на структуроутворення під час кристалізації і встановлено механізм подрібнення зернової структури за рахунок механічного руйнування дендритів, кавітаційної ерозії та зменшення переохолодження. При цьому встановлено, що пружні коливання жодним чином не впливають на зміну в'язкості розплавів та зміну критичних температур в зоні розтягування і стискання, як вважалося раніше. Експериментальне підтвердження наведених фактів міститься в тексті дисертації.

У четвертому розділі досліджено вплив фізичних факторів на процеси кристалізації реальних металевих заготовок. При цьому вони мали досить чималі розміри: наприклад, зливки із неіржавкої сталі має масу 35 кг. Тобто поставлені експерименти наближені до реальних умов. Тут встановлено реальний вплив вібрації на структуроутворення зливок. Результатом є не тільки подрібнення макроструктури, а ще перерозподіл структурних зон у металі. Встановлено, що вібрація практично усуває стовчасту структуру і

явище транскристалізації, а також сприяє більш рівномірному розподілу евтектики та мінімізації пористості. Ці дані підтверджують положення, які частково були відомі раніше. Проте автор наводить переконливі емпіричні рівняння та графіки, які конкретно показують залежності параметрів структуроутворення від параметрів вібрації і геометрії заготовок. Крім цього, вказується, що вібрація має так званий модифікувальний ефект, тобто кристалізація сплавів відбувається за схожим механізмом, як після додавання модифікаторів. Це дає змогу усунути із технології дефіцитні і часто не екологічні матеріали.

У загальних висновках відображено всі здобутки по експериментальним розділам. Висновки повною мірою відповідають на запитання, поставлені у завданнях дисертації, а також відображають наукову складову, мають чітку кореляцію із пунктами наукової новизни. Загальна кількість висновків 9, що повною мірою відповідає рівню роботи доктора філософії.

Наукова новизна отриманих результатів

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. Розвинуті уявлення щодо процесу гетерогенного зародження кристалів в розплавах металів при значно менших переохолодженнях, ніж переохолодження спонтанної кристалізації, а саме внаслідок активації адсорбованих на твердих підкладках зародків кристалізації при появі на їх поверхнях джерел для зростання.

Експериментально це положення доведено у п. 3.1 під час проведення досліджень із неметалевими модельними матеріалами: наявні формули, графіки і головне – фото макроструктур затверділих проб.

2. Вперше експериментально доведено, що залежність переохолоджень розплавів металів перед кристалізацією від температур їх перегріву зумовлена зміною стану (концентрації) наявних обмежено розчинних домішок. У літературі цю залежність пояснюють теоріями поверхневої та об'ємної кристалізації, але обидві теорії експериментально не підтверджуються на деяких металах.

Новизна цього пункту полягає в тому, що раніше було встановлено лише вплив безпосередньо температури перегрівання на рівень переохолодження,

при цьому роль домішок – як розчинних, так і нерозчинних – не було враховано.

3. Набула подальшого розвитку теорія про механізм впливу пружних коливань на зародкоутворення у розплавах металів. Встановлено, що цей механізм полягає у підвищенні активності адсорбованих на твердих домішках зародків. Активація відбувається через створення джерел для зростання на поверхнях таких зародків, які з'являються при їх механічному терті між собою, зі стінками ливарних форм, а також кавітаційної ерозії внаслідок впливу пружних хвиль на розплав металу.

Відомо, що пружні коливання мають механічний вплив на формування кристалів: вони призводять до руйнування дендритів, за рахунок чого подрібнюється мікроструктура. Вплив факторів тертя частинок між собою та кавітації автор дослідив вперше.

4. Експериментально доведено, що механізм впливу вібрації на формування структур литих металевих заготовок полягає у появі при їх кристалізації наступних додаткових ефектів: руйнування стовпчастих кристалів на поверхнях тепловідведення та розподілі цих уламків по об'єму розплаву; у підвищенні швидкості зародження кристалів у розплавах металів; пришвидшення тверднення за рахунок забезпечення постійного інтенсивного тепловідведення від розплаву.

Практичне значення отриманих результатів

Робота має більш фундаментальний, ніж прикладний характер, тому наукова складова у ній переважає практичну. При цьому роботу також спрямовано на практичні рекомендації щодо керування структуроутворенням сплавів за рахунок зовнішнього втручання під час кристалізації або зміни теплових умов.

Практичну значимість безперечно мають результати, які показують, яким чином досліджені фактори впливають на кристалізацію і як отримані в лабораторії результати можна реалізувати в процесах лиття. Наближення умов експерименту до реальних умов, введення масштабних коефіцієнтів дають змогу дійсно адаптувати результати до практичного застосування.

На реальних пробах із металевих сплавів автор отримав подрібнення мікроструктури у 5 – 15 разів, збільшення міцності на 54 – 62 %, пластичності – на 25 – 35 %. При цьому по перерізу зливків рівень механічних властивостей, як показано в табл. 4.1 і 4.2, практично незмінний.

Результати дисертаційної роботи Чистякова О. В. дійсно мають практичну значимість і можуть бути рекомендовані до впровадження, зокрема під час одержання зливків способом безперервного лиття, але мають перспективу поширення і на інші ливарні технології.

Зауваження до дисертаційної роботи

1. У розділах 3 і 4 (експериментальних), в яких мають викладатися виключно авторські результати експериментів, дуже багато елементів літературного огляду, тобто викладення посилань на дослідження інших фахівців.

2. В тексті дисертації, особливо по змісту розділу 3, є дуже багато згадувань про «розчинні домішки», але жодного конкретного прикладу їх не наведено. В органічних речовинах є згадка про воду як розчинну домішку, в металах – взагалі нічого не вказано, але при цьому автор наполягає, що такі домішки відіграють визначальну роль у процесі кристалізації.

3. Не наведено методику визначення таких властивостей як залишкові внутрішні напруження, величина газового прошарку між формою і виливком, розміри зерен і оксидних вкраплень, тому наведені результати виглядають недостатньо підтвердженими.

4. На графіках відсутні довірчі інтервали, які підтверджують точність і достовірність отриманих результатів.

5. Вважаю невдалими формулювання предмету дослідження (мають бути конкретні властивості або фізичні величини) та 4 пункту наукової новизни (з нього незрозуміло, що саме автор представляє нового, відмінного від інших дослідників та раніше відомих істин).

6. У роботі зазначається важливим такий параметр як «кавітаційний рівень», але не наведено методику його визначення (розрахунку) і результатів експериментів щодо його визначення.

7. Для дослідження впливу вібрації на структуроутворення сплавів автор не вказав, за яким принципом вибрав параметри вібрації. Вони дуже відрізняються для алюмінію та сталі, але не наведено залежностей або експериментальних даних щодо варіювання цих параметрів та вибору оптимальних значень.

8. На рис. 4.9 наведено мікроструктуру металевої проби, де вказано, що розміри неметалевих вкраплень дорівнюють 2 мкм. Не пояснено, за рахунок якої методики і головне на якому приладі визначено настільки дрібний розмір.

Загальний висновок

Дисертація Чистякова Олега Валерійовича на тему «Вплив пружних коливань і термочасової обробки на процеси кристалізації в металевих системах» має усі необхідні ознаки наукових робіт: актуальність, наукову новизну, практичне значення, результати викладено повно та достовірно. Отже, дисертація є завершеною кваліфікаційною науковою працею.

За формальними ознаками (якість оформлення, використання доречної термінології, додержання правопису та правил оформлення рисунків, формул таблиць тощо), а також враховуючи повноту опублікування результатів у фахових виданнях, дисертація повною мірою відповідає чинним вимогам до робіт на здобуття наукового ступеню доктора філософії. Згідно наведеного офіційного звіту, робота не містить жодних ознак академічного плагіату.

На підставі викладеного вважаю, що автор представленої дисертації, **Чистяков Олег Валерійович** заслуговує на присудження ступеню доктора філософії за спеціальністю 136 «Металургія» з галузі знань 13 «Механічна інженерія».

Офіційний опонент

професор кафедри ливарного виробництва

КПІ ім. Ігоря Сікорського

МОН України

доктор технічних наук, доцент

Ростислав ЛЮТИЙ

Підпис Лютого Р. В. засвідчує



Чистякова О.В.