

НУРАДИНОВ А.С.¹, ОСАДЧИЙ А.Г.²

(¹ФТИМС НАН України, м. Київ; ²КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ)

СИЛОВИЙ ВПЛИВ ІМПУЛЬСНИХ МЕТОДІВ ОБРОБЛЕННЯ НА ПРОЦЕС ФОРМУВАННЯ БЕЗПЕРЕРВНО ЛИТИХ ЗАГОТОВОК

E-mail: foundry@iff.kpi.ua

АНОТАЦІЯ. Досліджено вплив газоімпульсного та віброімпульсного оброблення на гідродинамічні та теплофізичні умови формування структури безперервно литих заготовок, тепломасоперенос у модельних і сталевих злитках та вплив зміни параметрів оброблення на майбутні властивості заготовок. Визначено оптимальні параметри частоти і амплітуди оброблення, які сприяють збільшенню тепловідведення, формуванню дисперсної структури заготовок та підвищенню їх механічних властивостей.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: безперервно лита заготовка, вібрація, газоімпульсне перемішування, макроструктура, мікроструктура, механічні властивості.

За останні десятиріччя різні способи зовнішніх динамічних впливів (електромагнітне та пульсаційне перемішування, ультразвук, вібрація та ін.) на виливки і безперервно литі заготовки в процесі затвердіння пройшли численні дослідні випробування, за допомогою яких накопичено чимало експериментального матеріалу. Проте, через відсутність фундаментальних досліджень широкого застосування вони не знайшли. Тому нами проведено дослідження щодо впливу газоімпульсного перемішування та вібрації на формування безперервно литих заготовок, з урахуванням їх впливу на гідродинаміку і теплофізику процесу кристалізації [1].

Практичний інтерес до газоімпульсного перемішування металевих сплавів у процесі затвердіння пов'язаний з тим, що це перемішування впливає на ріст кристалів, подрібнення дендритів, перерозподіл ліквіційних домішок, інтенсивність тепловідведення при формуванні безперервно литих заготовок і злитків.

Найбільш важливим при виборі раціональних параметрів цієї технології є аналіз гідродинамічних і теплофізичних процесів імпульсного впливу струменя рідкого металу на перемішування середовища тієї ж густини в обмеженому просторі [2, 3].

У питанні ефективності газоімпульсного оброблення важливу роль відіграє вибір раціональних параметрів перемішування, які викликають помірну турбулізацію розплаву і забезпечують ламінарне переміщення потоків сталі уздовж межі затвердіння [4, 5].

Занадто велика інтенсивність перемішування

руйнує рідко-тверду зону кристалізації сталі і, змиваючи ліквати з поверхні кристалів, переносить їх у ядро злитка.

Аналіз гідродинамічних процесів при газоімпульсному обробленні розплаву камфена на фізичній моделі показує, що воно викликає розвиток потужних кільцевих вихорів, які послідовно поширюються від вихідного перерізу трубки до нижньої частини кристалізатора (рис. 1).

Вихрові кільця захоплюють об'єми розплаву, створюючи інтенсивний рух. При цьому виникає силовий вплив на межу затвердіння камфена, який викликає руйнування дендритів.

Знання періоду впливу пульсації на межу затвердіння і товщину затверділого шару дозволило визначити вплив потужності перемішування на швидкість кристалізації камфена. Цілком очевидно, що турбулентні потоки вздовж межі



Рис. 1. Розвиток кільцевих вихорів при газоімпульсному обробленні розплаву камфена

затвердіння збільшували передачу теплоти від ядра заготовки до межі затвердіння і впливали тим самим на швидкість кристалізації камфена. Чим інтенсивніше перемішування (вища частота пульсації) розплаву і більша глибина занурення трубки, тим сильніший його вплив на закон зміни товщини затверділого шару (рис. 2, а, б).

Зворотно-поступальне перемішування ядра заготовки пульсуючим струменем сприяло інтенсифікації тепловідведення від більш гарячих об'ємів розплаву до межі затвердіння, про що свідчить підвищення температури поверхні заготовки (рис. 3, а, б) і зниження швидкості наростання кірки. Характерно, що інтенсивне зниження температури поверхні заготовки і велика швидкість наростання кірки відзначені у верхній частині кристалізатора. Це пов'язано з інтенсив-

ною віддачею теплоти перегрівання від розплаву до стінок кристалізатора.

Основний вплив газоімпульсного перемішування розплаву випадає на динаміку просування фронту кристалізації в вертикальному напрямку (рис. 4, а), що пов'язано з обламуванням гілок дендритів ударами хвиль і осіданням їх уламків на дно заготовки. Найбільш значне збільшення насипу вертикального шару уламків досягається при частотах пульсації 10...15 Гц, тобто близьких до резонансної частоти (в досліді вона становила 0,87...1,31 резонансної частоти відповідно). Цьому ж сприяє занурення пульсаційної трубки на глибину 75 мм від поверхні розплаву (рис. 4, б). Менша глибина занурення трубки в розплав (55 мм і 25 мм) знижує ефективність газоімпульсного перемішування через збільшення

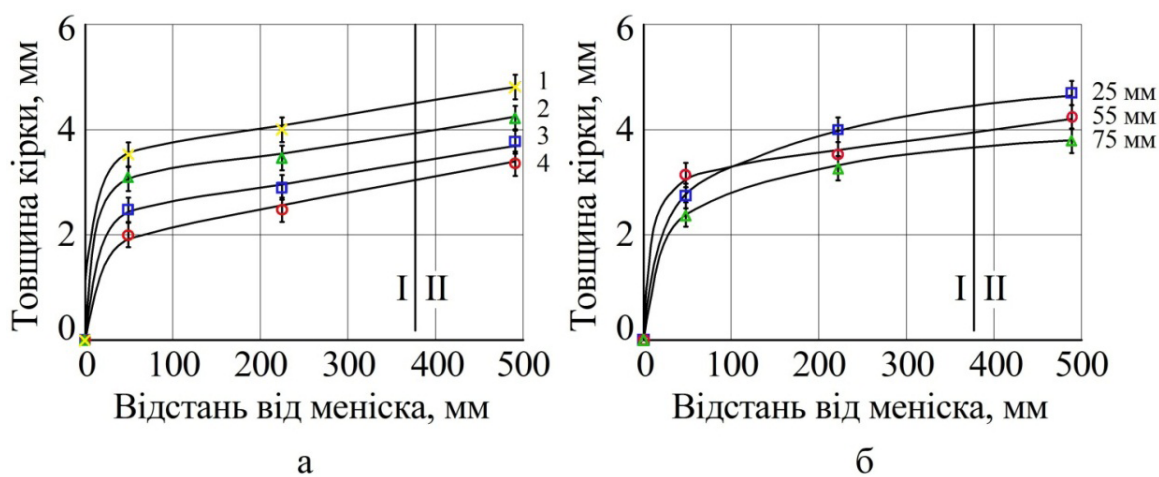


Рис. 2. Вплив частоти пульсації (а) і глибини занурення трубки в розплав (б) на зміну товщини затверділого шару при газоімпульсному перемішуванні: I – зона кристалізатора; II – зона вторинного охолодження; 1 – без оброблення; 2 – частота пульсації 1 Гц; 3 – 3 Гц; 4 – 5 Гц

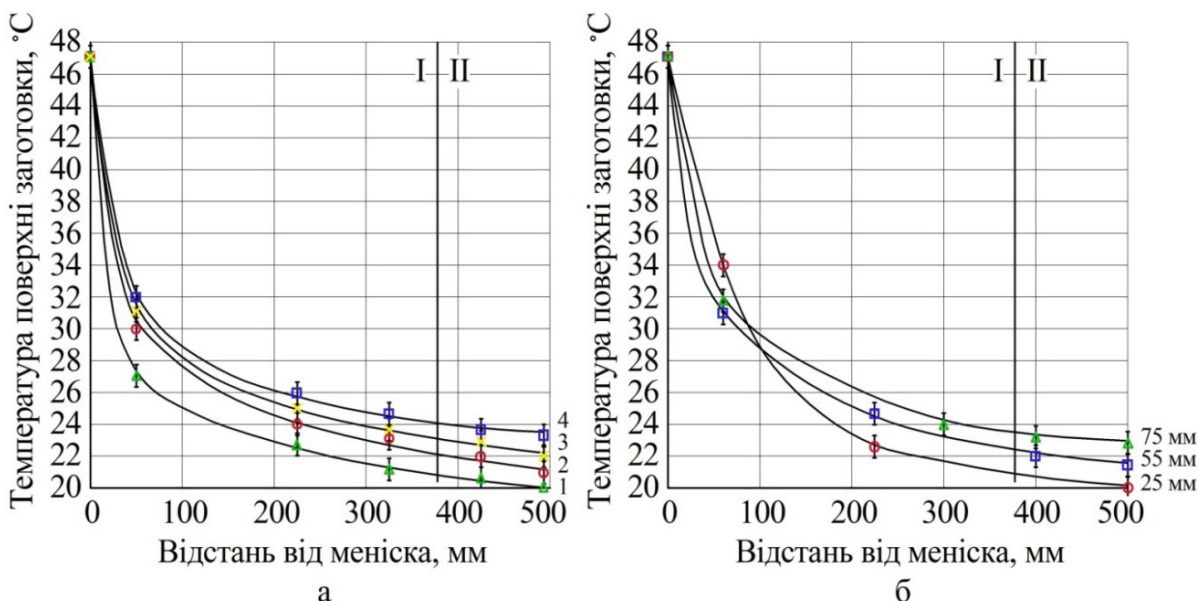


Рис. 3. Вплив частоти пульсації (а) і глибини занурення трубки в розплав (б) на температуру поверхні заготовки камфена: I – зона кристалізатора; II – зона вторинного охолодження; 1 – без оброблення; 2 – частота пульсації 1 Гц; 3 – 3 Гц; 4 – 5 Гц

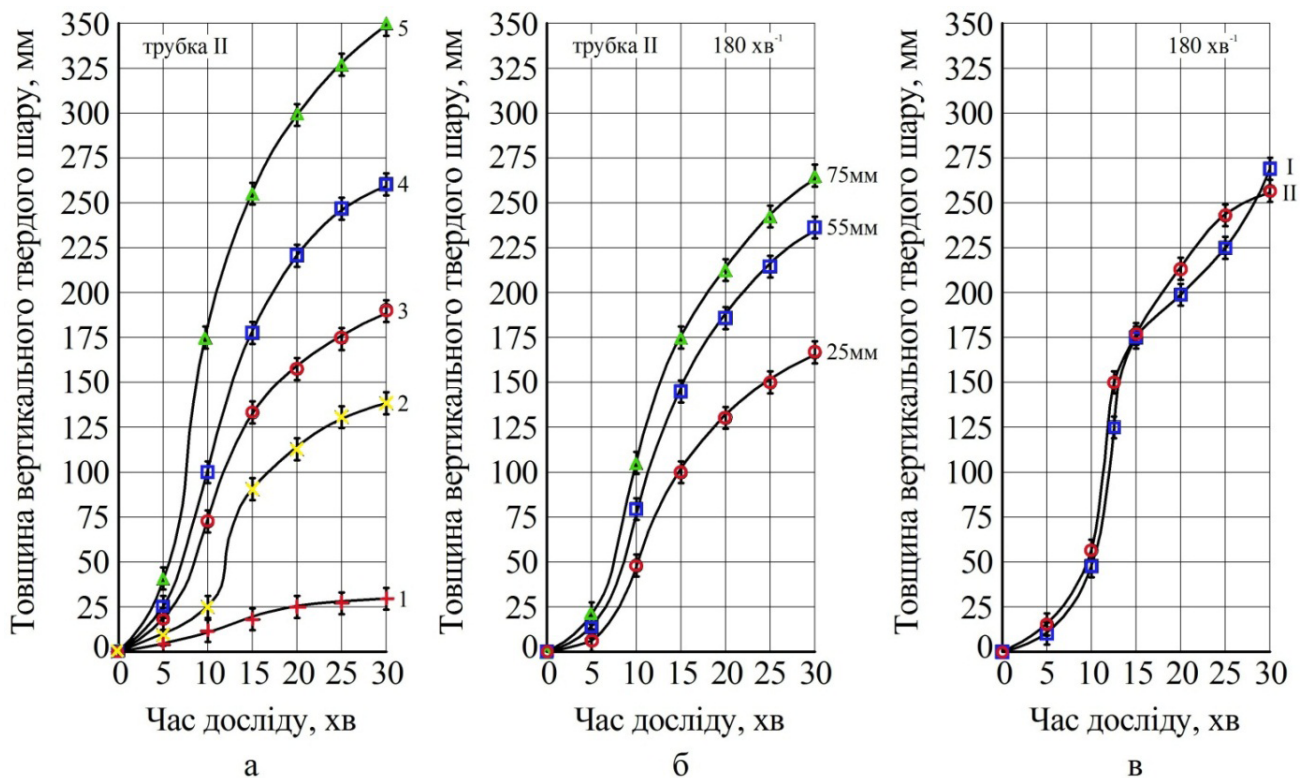


Рис. 4. Зміна вертикальної швидкості кристалізації в залежності від: а – частоти пульсації; б – глибини занурення пульсаційної трубки; в – типу трубки: 1 – без оброблення; 2 – частота пульсації 70 хв⁻¹; 3 – 150 хв⁻¹; 4 – 180 хв⁻¹; 5 – 600 хв⁻¹; I – прямоточна трубка; II – трубка з боковим отвором

різниці між резонансною і робочою частотами. Зміна конструкції пульсаційної трубки істотно не вплинула на кінетику кристалізації заготовки (рис. 4, в).

Отримані дані щодо кінетики формування заготовки свідчать про те, що при великій інтенсивності перемішування можна пригальмувати наростання бічної кірки, що забезпечує більш швидке відведення теплоти перегрівання і настання періоду об'ємної кристалізації ядра заготовки.

Разом з тим, слід підкреслити важливість вибору раціональних параметрів пульсації, які викликають помірне перемішування розплаву і забезпечують тим самим оптимальні гідродинамічні та теплофізичні умови формування заготовки.

Накладання віброімпульсу на безперервно литі заготовки під час затвердіння може бути реалізовано різними способами, наприклад, прикладання віброімпульсу до кристалізатора або безпосередньо до заготовки.

Вібрація обламує кристали на межі затвердіння, вирівнює нерівномірність фронту кристалізації, що може виключити утворення «містків» і за рахунок осідання уламків зменшити глибину лунки рідкого металу [6, 7].

Одним із найбільш складних питань вібраційного оброблення є вибір місця прикладання і напрямку віброімпульсу до заготовки, що твердіє.

Основними критеріями, за якими оцінювали ефективність впливу вібраційного оброблення на формування безперервно литої заготовки, в наших дослідженнях були:

- товщина затверділої кірки;
- глибина рідкої лунки.

З огляду на те, що вібрація обламує кристали, що ростуть, можна було очікувати, що чим сильнішим буде вібраційний вплив, тим інтенсивнішим буде процес руйнування дендритів [8, 9]. Дійсно, з рис. 5 видно, що при однакових параметрах вібрації дендрити сильніше руйнуються при повздовжньому щодо положення заготовки напрямку імпульсів, що забезпечує меншу товщину кірки розплаву і тим самим сприяє більш інтенсивній теплопередачі в зоні вторинного охолодження.

Різна ефективність руйнування дендритів пов'язана з тим, що при поздовжньому напрямку віброімпульсу згинальні зусилля вібрації спрямовано перпендикулярно до осей кристалів, а при поперечному – уздовж осей кристалів. Як наслідок, у першому випадку потрібно менше зусилля для обламування кристалів, ніж у другому.

Формування оболонки заготовки, що твердіє, супроводжується двома явно вираженими процесами. У початковий період затвердіння відбувається, головним чином, відведення

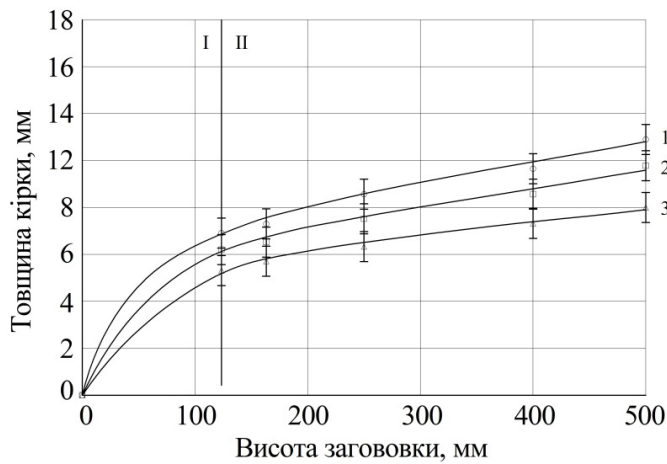


Рис. 5. Експериментальні значення товщини кірки заготовки камфена по висоті кристалізатора і частини зони вторинного охолодження: I – зона кристалізатора; II – зона вторинного охолодження; 1 – без вібрації; 2 – накладання віброімпульсу в зоні вторинного охолодження (поперечна вібрація); 3 – накладання віброімпульсу в зоні вторинного охолодження (повздовжня вібрація)

теплоти перегрівання сплаву і незначне зростання товщини кірки заготовки. У цей період спостерігається найінтенсивніша передача теплоти від поверхні заготовки до кристалізатора, про що свідчать дані щодо зміни температури поверхні заготовки в зоні кристалізатора і під кристалізатором (рис. 6).

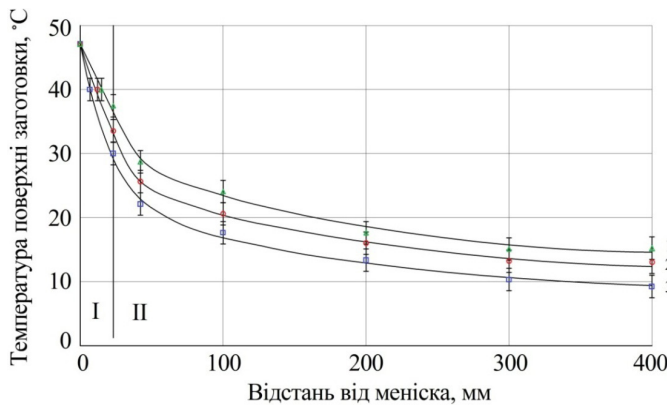


Рис. 6. Вплив частоти вібрації на температуру поверхні заготовки: I – зона кристалізатора; II – зона вторинного охолодження; 1 – без вібрації; 2 – частота вібрації 60 Гц; 3 – частота вібрації 80 Гц

В ході подальшого затвердіння переважає виділення внутрішньої теплоти (теплоти кристалізації), що знижує темп охолодження поверхні заготовки. Накладання вібрації підвищує температуру поверхні кірки заготовки як в зоні кристалізатора (I), так і в зоні вторинного охолодження (II) за рахунок більш інтенсивного теплообміну між кіркою заготовки і її більш гарячою рідкою серцевиною.

Інтенсифікація теплопередачі від поверхні заготовки в кристалізаторі і зоні вторинного охолодження, про що свідчить зміна температури

поверхні заготовки в цих зонах (рис. 7), пов'язана із збільшенням теплових потоків, які підводяться до межі затвердіння, за рахунок впливу вібрації (рис. 8). Дійсно, з даного рисунка видно, що значення теплових потоків при дії вібрації ($\omega = 80$ Гц і $A = 1,5$ мм) збільшуються до 30...40% в порівнянні зі звичайними умовами затвердіння. А це, в свою чергу, впливає на інтенсивність тепловіддачі в кристалізаторі і зоні вторинного охолодження.

У табл. 1 наведено результати розрахунків теплового балансу безперервно литого злитка камфена в умовах звичайного затвердіння і під дією вібрації.

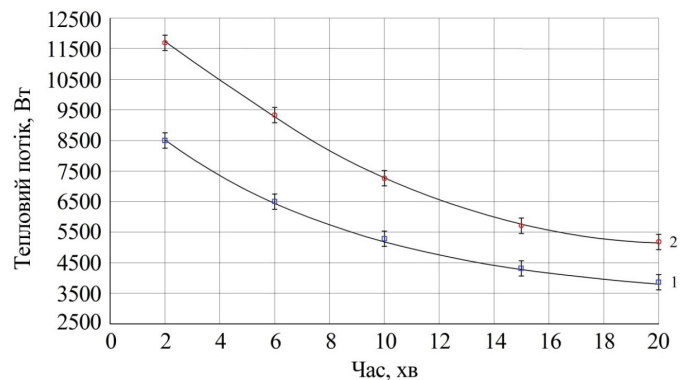


Рис. 7. Зміна теплового потоку в модельній безперервно литій заготовці в часі: 1 – без вібрації; 2 – частота вібрації 80 Гц, $A = 1,5$ мм; швидкість витягування заготовки – 40 см/хв

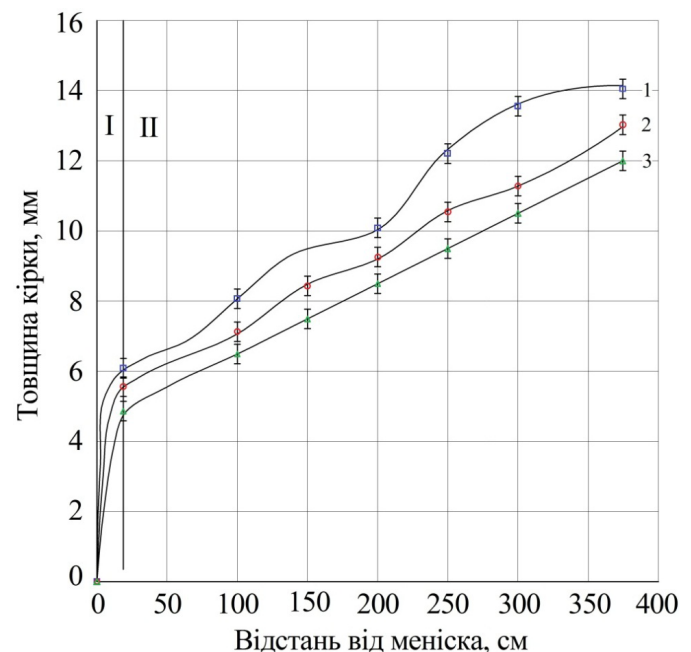


Рис. 8. Вплив частоти вібрації на динаміку росту кірки заготовки при постійній амплітуді ($A = 1,5$ мм): I – зона кристалізатора; II – зона вторинного охолодження; 1 – без вібрації; 2 – частота вібрації 60 Гц; 3 – частота вібрації 80 Гц

Таблиця 1 – Результати розрахунків теплового балансу безперервно литого злитка камфена в умовах звичайного затвердіння і під дією вібрації

| Загальна кількість теплоти та її витрати | Злиток камфена 45x110 мм | | | |
|---|--------------------------|-----|--------------|-----|
| | без вібрації | | при вібрації | |
| | ккал/год | % | ккал/год | % |
| Загальна кількість теплоти, отриманої рідким розплавом | 8400 | 100 | 8400 | 100 |
| Тепло, втрачене в кристалізаторі | 1680 | 20 | 2350 | 28 |
| Тепло, втрачене в зоні вільного охолодження | 3950 | 47 | 4950 | 59 |
| Тепло, яке втрачається в зоні вільного охолодження на повітрі | 2770 | 33 | 1100 | 13 |

З таблиці видно, що вібрація підсилює тепловідведення від злитка як у зоні кристалізатора на 8%, так і в зоні вторинного охолодження на 12%. При цьому точка підведення віброімпульсу знаходиться в зоні вторинного охолодження на відстані 3...4 мм, від кристалізатора, виходячи з перерахунку на натуральні процеси.

Застосування вібрації призводить до зниження товщини і нерівномірності затверділої кірки заготовки в її поперечному перерізі (рис. 8), причому істотні розбіжності в товщині бічної кірки починаються нижче кристалізатора і збільшуються по мірі віддалення від нього.

Цей факт пояснюється двома причинами:

а) по-перше, вібрація, як зазначалося вище, призводить до нагрівання кірки заготовки за рахунок інтенсифікації перемішування розплаву, що уповільнює її зростання;

б) по-друге, за рахунок пружних поздовжніх хвиль, створюваних вібрацією, відбувається обламання дендритів на вертикальному фронті кристалізації заготовки. Уламки дендритів опускаються уздовж фронту кристалізації і осідають на дно рідкої лунки, а до них додаються кристали, які зародилися в глибині розплаву внаслідок кавітації.

В результаті починається різке збільшення висоти уламків дендритів, які осідають на дно. Безперервне заповнення рідкої лунки уламками дендритів і кристалів з подальшим затвердінням двохфазного об'єму розплаву призводить до істотного скорочення глибини лунки при накладенні вібрації на безперервно литу заготовку в процесі затвердіння (рис. 9).

Зменшення глибини рідкої лунки і руйнування стовпчастих дендритів на фронті кристалізації значно зменшує (в умовах експеримента взагалі виключає) імовірність утворення містків, які є основною причиною виникнення осьової пористості і, як наслідок, осьової ліквідації. Осьова пористість при звичайних умовах кристалізації обумовлена, як вказувалося вище, усадкою металу при затвердінні. Через нестачу рідкого металу

нижче утворених містків, кристалізація відбувається в умовах розрідження, яке сприяє перерозподілу ліквідаційних елементів (тобто інтенсифікує виділення лікватів), утворюючи осьову ліквідацію [10].

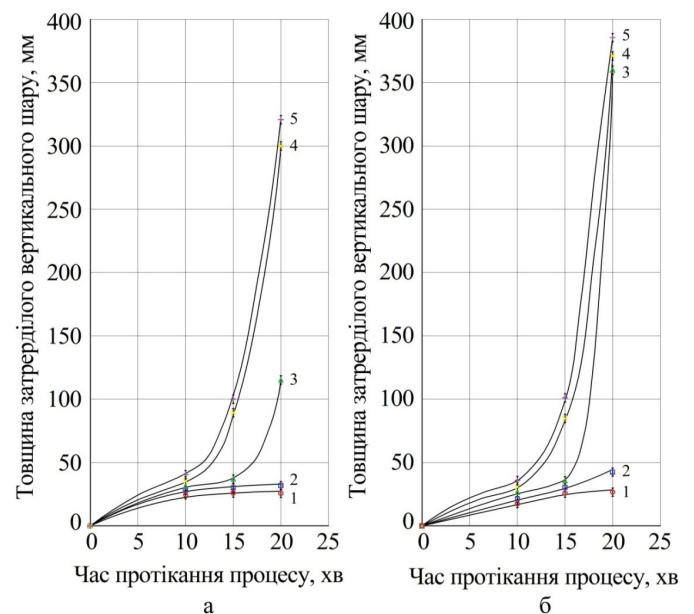


Рис. 8. Вплив параметрів вібрації на висоту насипу уламків дендритів на дно рідкої лунки: 1 – без вібрації; 2 – частота вібрації 40 Гц; 3 – 60 Гц; 4 – 80 Гц; 5 – 100 Гц; а – амплітуда вібрації 0,5 мм; б – 1,5 мм

Ефективність вібрації істотно залежить від її параметрів. З наведених на рис. 9 даних видно, що незалежно від величини амплітуди частота вібрації 40 Гц відносно слабо впливає на процес формування безперервно литої заготовки. Істотний вплив вібрації починається з частоти 60 Гц і закінчується практично при частоті 80 Гц. Подальше підвищення частоти до 100 Гц вже несуттєво впливає на ефективність процесу формування заготовки. Збільшення амплітуди вібрації підсилює вплив її частоти.

Вплив параметрів вібрації на процес формування безперервно литої заготовки дещо різний: величина амплітуди вібрації сприяє, в основному, процесу обламання вершин дендритів уздовж фронту кристалізації, в той час як

частота вібрації – сприяє зародженню кристалів в об'ємі рідкої частини заготовки. Збільшення обох параметрів вібрації до певної межі (в умовах наших експериментів вони мали значення $A = 1,5$ мм; $\omega = 80$ Гц) забезпечує максимальну ефективність її впливу на процес формування безперервно литої заготовки.

ВИСНОВКИ:

1. Аналіз результатів досліджень, проведених на прозорій фізичній моделі, дозволяє стверджувати, що вібрація сприяє посиленню тепловідведення від безперервно литої заготовки в процесі затвердіння за рахунок інтенсифікації теплових потоків, які підводяться до межі затвердіння, на 30...40%, і забезпеченню мінімальної товщини затверділої кірки внаслідок обламування дендритів.

2. Обламуючи дендрити на межі затвердіння, вібрація усуває нерівномірність фронту кристалізації і зменшує ймовірність утворення «містків», які є головними причинами виникнення осьової пористості і ліквациї. За рахунок осідання уламків дендритів значно зменшується глибина рідкої лунки (в умовах експериментів у 2...4 рази залежно від параметрів вібрації).

3. Найбільший ефект вібраційного впливу на заготовку досягається при підведенні віброімпульсу в зоні вторинного охолодження, а оптимальний напрямок імпульсу – паралельно осі

безперервно литої заготовки. При цьому помітно посилюється тепловіддача від зливки, як в зоні вторинного охолодження (12%), так і в зоні кристалізатора (8%).

4. Результати досліджень по газоімпульсному обробленню розплаву показують, що воно викликає розвиток потужних турбулентних потоків по осі заготовки, які послідовно поширюються від вихідного перерізу, зануреного в розплав, аж до верхньої частини зони вторинного охолодження. При цьому виникають кільцеві вихори, які створюючи інтенсивний рух розплаву, надають силовий вплив на межу затвердіння і викликають обламування дендритів.

5. Дані щодо кінетики формування заготовки свідчать про те, що при високих частотах пульсації можна пригальмувати наростання кірки, за рахунок чого забезпечується більш інтенсивне зняття тепла перегрівання. Силовий вплив потоку, що пульсує, на фронт кристалізації призводить до обламування дендритів і їх осідання на дно. При цьому необхідно вибрати раціональні параметри перемішування, які виключають турбулізацію всього об'єму рідкої фази і забезпечують оптимальні гідродинамічні та теплофізичні умови формування заготовки. За даними моделювання можна рекомендувати наступні параметри: частота пульсації $150...180$ хв⁻¹; амплітуда $60...100$ мм і глибина занурення труби $180...190$ мм.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Смирнов А.Н. Процессы непрерывной разливки / А.Н.Смирнов, В.Л. Пилюшенко, А.А. Минаев. – Донецк: ДонНТУ, 2002. – 536 с.
2. Ефимов В.А. Технологии современной металлургии / В.А.Ефимов, А.С. Эльдарханов. – М.: Новые технологи, 2004. – 784 с.
3. Ефимов В.А. Металлургические аспекты перемешивания сплавов в ковше и затвердевающей плитке / Процессы разливки и кристаллизации стали. – К.: ИПЛ АН УССР. – 1991. – С. 3...12.
4. Ефимов В.А. Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов / В.А. Ефимов, А.С. Эльдарханов. – М.: Металлургия, 1995. – 272 с.
5. Смирнов А.Н. О модифицирующем эффекте при пульсационном перемешивании жидкой фазы стальных слитков в процессе их затвердевания / А.Н. Смирнов, Т.В. Чернобаева // Процессы литья, 1995. – №1. – С. 65...68.
6. Найдек В.Л. Моделирование вибрационной обработки непрерывнолитых заготовок / В.Л. Найдек, А.С. Нурадинов, А.С. Эльдарханов, Е.Д. Таранов / Международный научно-технический конгресс. – К., 2004. – С. 50...52.
7. Гладков М.И. Виброобработка жидкого металла / М.И. Гладков, Ю.А. Балакин // Литейное производство, 2000. – №12. – С. 7...8.
8. Найдек В.Л. Применение динамических воздействий для повышения качества слитков и непрерывнолитых заготовок / В.Л. Найдек, А.С. Нурадинов, А.С. Эльдарханов, Е.Д. Таранов // Процессы литья, 2005. – №1. – С. 34...39.

9. Майоров А.И. Повышение качества непрерывнолитых заготовок под воздействием вибрации / А.И. Майоров, Ю.П. Кирдеев, В.И. Строева и др. // Сталь, 1984. – №11. – С. 26...27.
10. Нурадинов А.С. Влияние внешних воздействий на перемещение ликвирующей фазы в затвердевающем слитке / А.С. Нурадинов, Е.Д. Таранов, А.С. Эльдарханов, В.А. Ефимов // Процессы литья, 2004. – №2. – С. 37...40.