

УДК 621.74

<https://doi.org/10.34185/tpm.4.2019.05>

Могилатенко В.Г.

Візуалізація твердіння виливка під впливом вібрації

Mogylatenko V.G.

Visualization solidification casting under the influence of vibration

У представленій статті наведені результати щодо впливу вібрації на твердіння виливка, які одержані фізичним моделюванням на модельній прозорій рідині з невисокою температурою топлення, яка імітує розплавлений метал.

Метою роботи було порівняння кристалізації великих злитків у виливницях і відносно невеликих фасонних виливків, дослідження як механізму твердіння, так і кінетики процесу.

У процесі виконання роботи було виготовлено кристалізатор з водяним охолодженням за своєю внутрішньою формою відмінний від виливниці для злитків і який має елементи, що відповідають фасонному виливку. Тобто, внутрішню стелю, внутрішні кути, кишені, стояк-надлив. Для створення вібрації використали електродинамічний вібраційний стенд, який дає можливість змінювати амплітуду коливань при промисловій частоті.

З аналізу літературних даних відомо, що вібрація позитивно впливає на структуру і властивості великих злитків. Відбувається подрібнення як макроструктури, так і мікроструктури. Механічні властивості, як правило, зростають. Всім відомий ефект модифікування спричинений вібрацією злитка.

Досліджено вплив вібрації на механізм та кінетику твердіння виливка з модельної речовини, за яку використували тіосульфат натрію. Використали чотири різних амплітуди коливань. Фото і кінозйомка дозволили зафіксувати особливості твердіння, визначити кінетику цього процесу.

В роботі вперше візуалізоване твердіння виливка як у звичайних умовах, так і в умовах фізичного впливу на розплав. Встановлений позитивний вплив вібрації на твердіння модельної речовини виливка, зокрема зникнення усадкової раковини у тепловому вузлі виливка. Встановлено, що при вібрації переважає твердіння у її напрямку, в той час як без вібрації твердіння визначається напрямом тепловідведення.

Практична значущість проведеного дослідження полягає у можливості створення направленого прискореного твердіння виливка з подрібненою структурою і зменшенням поруватості і усадкової раковини в теплових вузлах.

Ключові слова: твердіння виливка, вібрація, подрібнення макроструктури, фізичне моделювання, прозора модель.

This article presents the results on the effect of vibration on the crystallization of casting obtained by physical modeling on a model liquid with a low melting point simulating molten metal.

The aim of the work was to compare the crystallization of large ingots and relatively small shaped castings, to study both the mechanism of crystallization and the kinetics of the process.

When performing the work, a water-cooled crystallizer was manufactured in its internal form, different from the ingot mold and having elements corresponding to the shaped casting. That is, the inner ceiling, the inner corners, pockets, riser-overflow. An electrodynamic vibration stand was used to create the vibration, which makes it possible to change the amplitude of vibrations at an industrial frequency.

From the analysis of the literature it is known that vibration has a positive effect on the structure and properties of large ingots. There is a grinding of both macrostructure and microstructure. Mechanical properties tend to increase. Everyone knows the effect of modification caused by the vibration of the ingot.

The effect of vibration on the mechanism and kinetics of solidification of casting of a model substance is investigated. Four different oscillation amplitudes were used. Photos and filming allowed us to capture the features of the solidification and to determine the kinetics of this process.

For the first time, crystallization of casting was visualized both under normal conditions and under conditions of force physical influence on the melt. Positive influence of vibration on the hardening of the casting model substance was established, in particular the disappearance of the defects of the shrinkage origin at the thermal node of the casting. It was found that during vibration the solidification in its direction prevails, while without vibration the solidification is determined by the direction of heat dissipation.

The practical significance of the study is the possibility of creating a directional accelerated casting curing with good structure and reduction of porosity and shrinkage defects in thermal units.

Keywords: casting hardening, vibration, macrostructure grinding, physical modeling, transparent model.

Вступ

Прогрес у будь-якій області машинобудування визначається можливістю одержання конструкційних металевих матеріалів з високими експлуатаційними характеристиками. До механічних характеристик сплавів і їх стабільності висуваються усе більш високі вимоги. Існує кілька напрямків одержання більш високих властивостей ливарних сплавів - це створення нових сплавів, легування, мікролегування і модифікування існуючих. З цих напрямків модифікування найменш дорога операція, що дозволяє шляхом зміни форми фазових і

структурних складових сплаву підвищити і стабілізувати властивості виробів. Під модифікуванням [1,2] частіше розуміють усяку зміну кількості зародків кристалізації або лінійної швидкості росту кристалів у результаті спеціальних умов плавки чи обробки розплаву.

Зацікавленість способами фізичного впливу на кристалізацію сплавів останнім часом помітно зростає. Це, перш за все, накладання на метал електромагнітного поля, механічне перемішування, механічна вібрація, обробка ультразвуковим полем, пропускання електричного струму та ін.

Щодо накладання на розплав вимушених коливань, то у ливарному виробництві застосовується механічне струшування, вібрація і ультразвукова обробка для ущільнення формувальної суміші і для впливу на метал, що кристалізується.

У металургійному та ливарному виробництві не завжди є можливість виконання натурального експерименту тому, що проведення дослідів в умовах підприємства вимагає багато коштів і сам дослідний метал не використовується у виробництві, а йде на переплавлення. У більшості випадків дослідники впливають на метал певними технологічними чи фізичними факторами і одержують кінцевий результат, який і підлягає аналізу. Як відбувається формування кінцевого результату не завжди зрозуміло і не завжди може бути виявлено. При неможливості проведення прямих експериментів чи комп'ютерного моделювання на допомогу приходять фізичне моделювання процесів, які відбуваються при високих температурах. Воно дає можливість візуально при невисоких температурах оцінити фізичні високотемпературні процеси, що відбуваються при твердінні виливків реальної форми.

Щодо кристалізації великих злитків металу, то процес твердіння вивчають на прозорих моделях з використанням легкоплавких модельних речовин - тіосульфату натрію ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), камфену та інших речовин, низька температура плавлення яких дозволяє проводити експерименти у лабораторних умовах з розплавленням речовини на водяній бані. Такі речовини задовольняють умовам кристалізації розплаву сталі.

Виходячи з наведеного є доцільним використати досвід вивчення кристалізації великих злитків при різних умовах на прозорих моделях стосовно кристалізації виливків.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

На сьогодні вважається встановленим позитивний вплив вібрації на структуру та властивості виливків. Вважають, що механічна вібрація являє собою коливання з частотою від 1,5 до 10000 Гц і амплітудою від 0,01 до 5 мм. Метою такої вібрації є отримання щільної, без раковин, дрібнодисперсної структури сплавів, внаслідок чого збільшується міцність і пластичність виливків. Чим вище частота вібрації, тим більше зростає міцність сплаву. Низькочастотна вібрація це механічне перемішування розплаву, або незатверділої частини виливка.

Вважають, що механізм впливу вібрації на кристалізацію сплавів полягає у руйнуванні великих зростаючих дендритів, уламки яких збільшують кількість нових центрів кристалізації. Це призводить до подрібнення макро- і мікроструктури і скорочення зони стовпчастих кристалів на межі поділу форма-вливков. Вібрація дозволяє інтенсифікувати тепло-масо-обмінні процеси, подрібнити, і, одночасно, прискорити виведення неметалічних включень, дегазацію металу та зменшити ліквідацію у сплаві. Про механізм кристалізації в умовах ві-

браційного впливу на розплав судять по кінцевому результату, тобто по одержаній структурі та механічним властивостям виливка.

Так вплив акустичними хвилями кілогерцового діапазону (з частотою 250кГц) на кристалізацію алюмінієвого сплаву з 5,9% магнію [3] при литті у чавунну форму дозволило подрібнити макроструктуру сплаву і підвищити тимчасовий опір розриву на 16%, відносно видовження - майже на 90% і відносно звуження - на 130%.

Досліди по вібрації кокіля з частотою 500 Гц і амплітудою 0,5-2,0 мм в умовах підприємства на серійних різностінних виливках складної конфігурації масою 28 кг зі сплаву АЛ5 (АК5М) показало усунення браку литва по недоливам і холодним спаям. Структура металу помітно покращилася, механічні властивості підвищилися на 8-10%. Віброобробку можна використовувати для впливу на процес твердіння виливків, отримання в них подрібненої структури і підвищення механічних властивостей литва. Накладанням ультразвукового поля зі зростаючою частотою вібрації досягається прискорення кристалізації і підвищення однорідності структури по товщині тіла виливка (злитка) [4].

Електро-гідро-імпульсна обробка розплаву приводить до значних змін у співвідношенні фаз сплаву на основі магнію [5].

Оскільки вивчення впливу вібрації на формування безперервно литої заготовки натурним методом майже неможливо і вимагає багато коштів, то застосовують метод фізичного моделювання з використанням у якості модельної речовини камфену з трицикленом. Проведені дослідження показали, що збільшення частоти та амплітуди коливань призводить до збільшення кількості тепла відведеного у кристалізатор і, відповідно, швидкості кристалізації. Щодо структурних змін, то змінюються розміри зон рівновісних дрібних, стовпчастих орієнтованих і розорієнтованих кристалів [6, 7].

Існує багато наукових робіт, у яких застосовується моделювання кристалізації злитків на прозорих моделях. Але переважна більшість їх стосується процесів, що відбуваються при твердінні великих злитків в різних умовах охолодження, наприклад злитків сталі у металевих виливницях, у водоохолоджуваних кристалізаторах при безперервному і напівбезперервному литті, при накладанні на виливницю чи кристалізатор вібрації, ультразвуку тощо. Порівняно зі злитком виливок має набагато складнішу конфігурацію. У порожнині формі, як правило, існують виступи та западини, які повинні впливати на формування структури виливка.

Мета і завдання досліджень

Виходячи з вищевикладеного метою даної роботи було дослідження, аналіз і визначення особливостей твердіння, формування макроструктури і дефектів виливка у формі на модельній речовині в умовах вібрації, визначення кінетики твердіння модельної речовини при вібраційному впливі, про-

ведення порівняння одержаних результатів з кристалізацією виливка без будь-якого фізичного впливу на розплавлену модельну речовину.

При цьому було необхідно вирішити наступні задачі:

виготовити модель внутрішньої порожнини форми,

удосконалити вібростенд,

визначити вплив вібрації на формування макроструктури виливка за результатами моделювання і зафіксувати одержані результати у вигляді кінограм.

Матеріали та методи дослідження

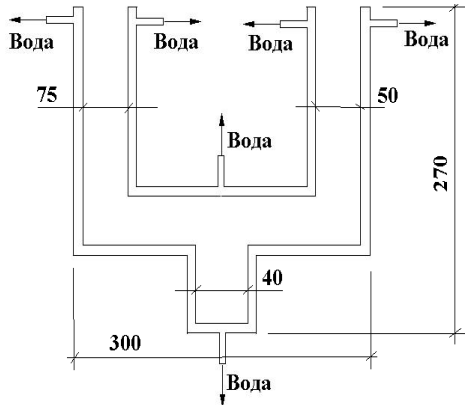


Рисунок 1 – Схема кристалізатора для виливка

Для вивчення твердіння виливка був виготовлений кристалізатор, який імітував порожнину форми і різні розміри виливка (рис. 1). Завдяки такій конфігурації ми змогли заміряти товщину кристалічного шару в перерізах 75мм, 50мм, 40мм і робити певні висновки щодо росту кристалів в цих місцях в певний момент часу.

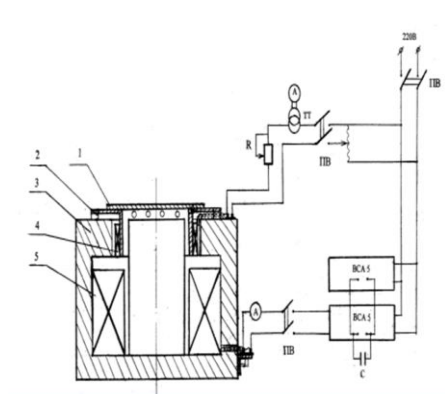


Рисунок 2 – Схема електродинамічного вібраційного стенду:

1 – робочий стіл; 2 – пластинчаті пружини; 3 – корпус; 4 – котушка збудження; 5 – котушка підмагнічування; ТТ – трансформатор електричного струму; ПВ – вимикач; R – реостат.

Кристалізатор був виготовлений зі сталевій трубки квадратного перерізу і прозорого пластику з нанесеною розміткою для спостереження і фіксації кінетики твердіння (залежності товщини кристалічного шару від часу твердіння).

Для створення вібрації використали електродинамічний вібраційний стенд (рис. 2), який являє собою електромагнітну систему, що складається з електромагніту і вібраційного столу (1), закріплених на пластинчатих пружинах (2) в корпусі (3). Електромагніт живиться постійним струмом від двох випрямлячів ВСА-5.

У кільцевому зазорі електромагніту розміщена котушка збудження (4), через яку на котушку підмагнічування (5) подається змінний електричний струм. Він взаємодіє з постійним магнітним полем, в результаті чого виникають вібраційні коливання робочого столу з частотою, що дорівнює частоті змінного електричного струму. Живлення обмотки збудження здійснюється лабораторним автотрансформатором, який дає можливість регулювати струм, тобто амплітуду коливання робочого столу, значення струму в котушках контролюється за допомогою амперметра.

Для проведення експериментів по твердінню модельної речовини кристалізатор кріпився до робочого столу у вертикальному положенні. До нього підводилася вода і пропускала до початку експерименту протягом 1-ї години для встановлення квазістаціонарних теплових умов. Швидкість потоку води через кристалізатор дорівнювала 0,8 л/хв. Температура води на вході завжди була практично однаковою, близько 11°C.

Модельну речовину (тіосульфат натрію) заливали після розплавлення її на водяній бані (температурі плавлення 48°C) від температури 60°C. Після заливання розплаву в кристалізатор фіксували час утворення твердого кристалічного шару товщиною 2, 5, 10, 15, 20, 25 мм у різних перерізах кристалізатора. Процес кристалізації фіксували фото- і кінозйомкою.

В роботі дослідили вплив вібрації з промисловою частотою 50Гц і амплітудами коливання 0,25мм, 0,35мм, 1мм і 1,5мм на формування структури виливка з тіосульфату натрію. При проведенні експериментів амплітуду коливань умовно поділили на два режими: невеликі (0,25 і 0,35мм) і великі амплітуди (1 і 1,5мм). Величину амплітуди коливань встановлювали заздалегідь електричним режимом. Для порівняння проводили вихідний експеримент без впливу вібрації.

Результати досліджень

В результаті проведених досліджень перш за все було отримано кінограми кристалізації модельної речовини у звичайних умовах без додаткового впливу на розплав. Ці результати наведені на рис. 3. А послідовні етапи твердіння під впливом вібрації малої амплітуди показані на рис. 4.

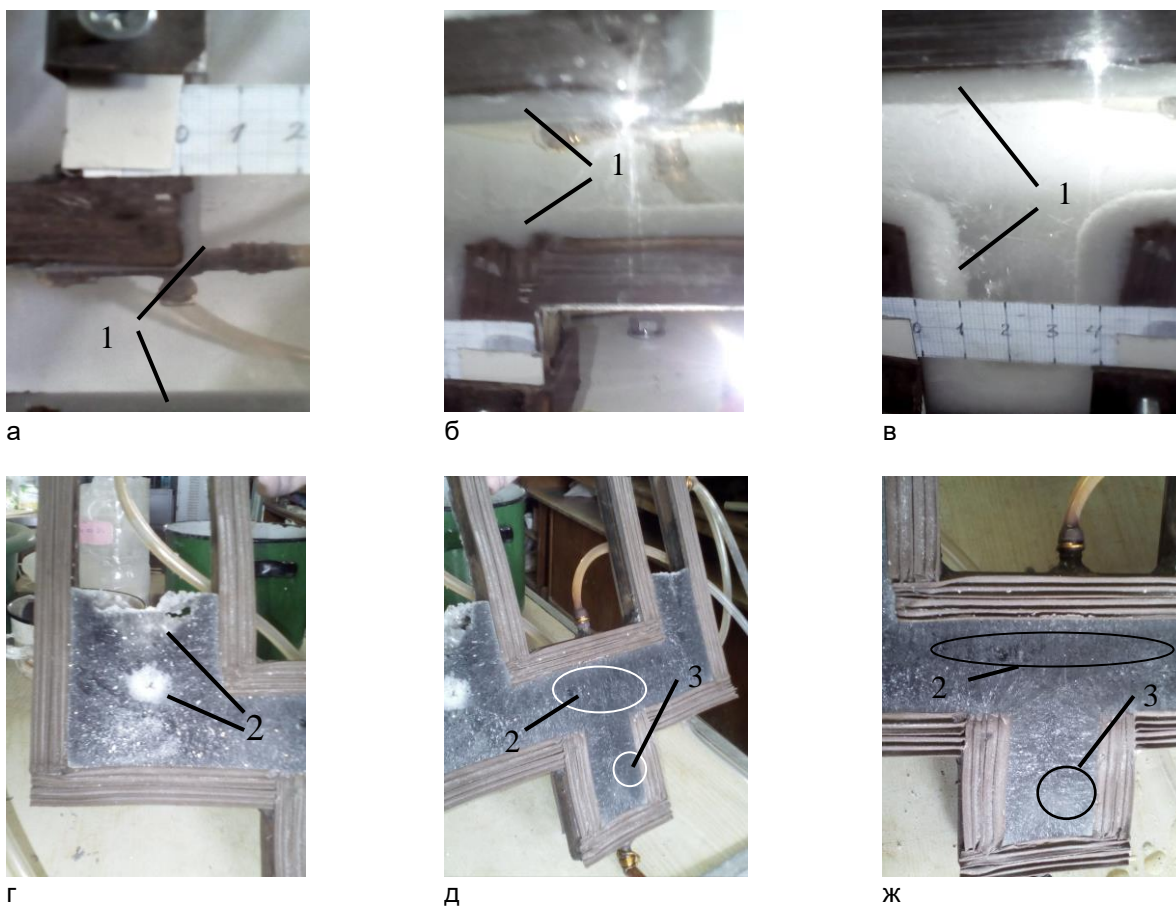


Рисунок 3 – Послідовні етапи твердіння (а,б,в) та місця утворення дефектів у затверділому виливку модельної речовини без вібрації (г,д,ж):

1 – затверділий шар, 2 – зона раковини, 3 – стик трьох фронтів кристалізації.

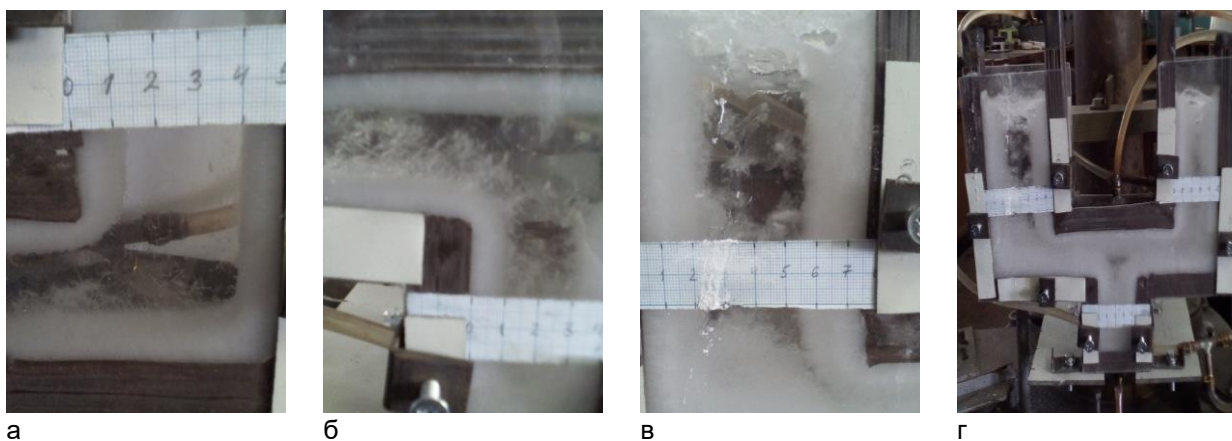


Рисунок 4 – Твердіння модельної речовини під дією малої амплітуди вібрації (а, б, в, г)

Зростання твердої фази на бокових стінках виливниці при невеликих амплітудах вібрації відбувається за тим же законом, що і у вихідному тіосульфаті натрію. У таблиці 1 наведено вплив вібрації

на швидкість кристалізації. За умови малих амплітуд вібрації форми з розплавом середня швидкість незначно підвищується.

Таблиця 1 – Вплив вібрації на швидкість кристалізації

Амплітуда коливання, мм	Швидкість твердіння, мм/с		
	на початку	наприкінці	середня
0	0,0090	0,0020	0,0055
0,25	0,0095	0,0035	0,0065
0,35	0,0100	0,0034	0,0067

Зростання амплітуди вертикальної вібрації у декілька разів (до 1 та 1,5мм) при частоті 50Гц сильно змінює загальну картину твердіння, що і зафіксовано на рисунку 5.

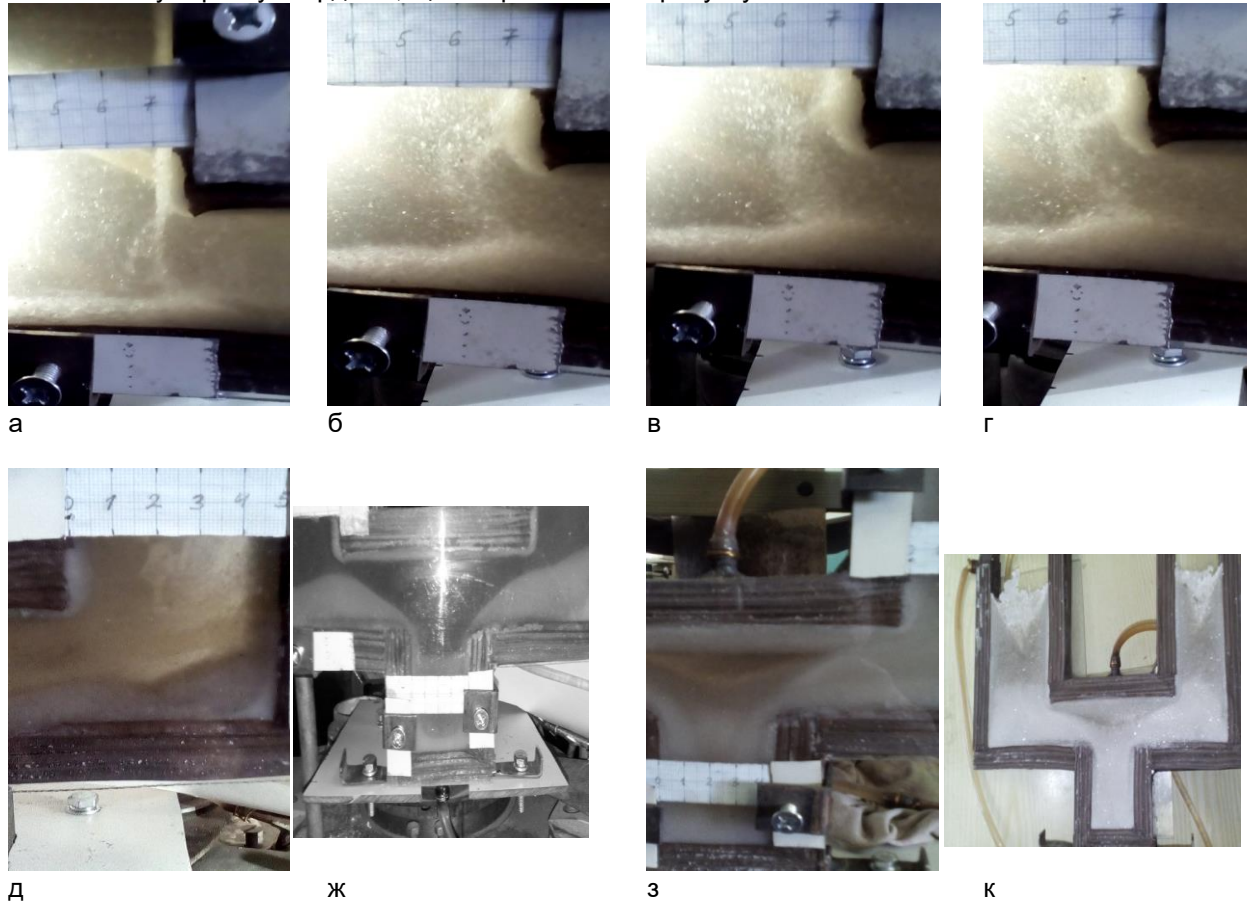


Рисунок 5 – Різні етапи твердіння модельної речовини при вібрації з амплітудою 1,5мм і частотою 50Гц

Кінетика твердіння модельної речовини за різних умов наведена на рис 6. Наростання твердої фази на стінках виливниці без впливу вібрації та при її невеликих амплітудах відбувається за логарифмічним законом твердіння.

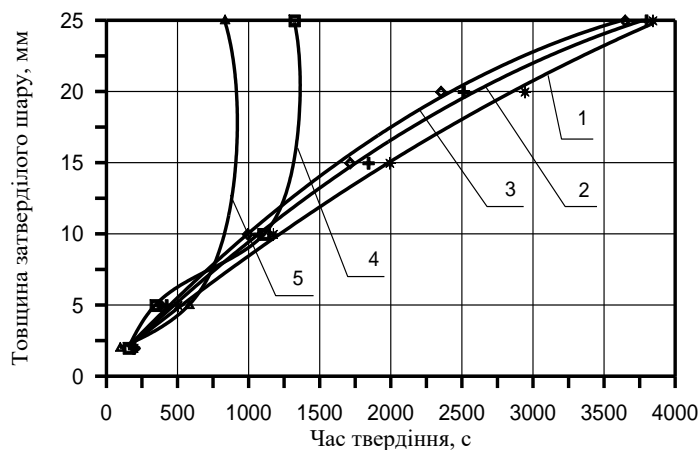


Рисунок 6 – Кінетика твердіння тіосульфату у виливниці:

1 – без вібрації; 2 – амплітуда коливання 0,25мм; 3 – амплітуда коливання 0,35мм; 4 – амплітуда коливання 1мм; 5 – амплітуда коливання 1,5мм

Обговорення результатів

Як і вказує класична теорія послідовної кристалізації без додаткового фізичного впливу, тобто вібрації, твердіння тіосульфату натрію починається від стінок форми і просувається у середину рідини практично з однаковою швидкістю у різних перерізах кристалізатора (рис. 3а,б,в). У процесі твердіння можливе осідання окремих утворених в об'ємі рідини кристалів (рис. 3в). Ці кристали формують конуси осадження (рис. 3д). Закінчення твердіння (рис. 3г,д,ж) супроводжується утворенням усадкової раковини біля вільної поверхні рідини та раковин у теплових вузлах виливка у місцях локалізації рідини зіткненням протилежно розташованих фронтів кристалізації.

При невеликих амплітудах коливання (0,25мм, 0,35мм) з частотою 50Гц спостерігається поступове осідання зростаючих кристалів у донну частину і твердий шар у нижній частині виливка наростає дещо швидше ніж без вібрації. На верхній частині порожнини форми твердий шар тоншає оскільки вертикальна вібрація сприяє відокремленню окремих кристалів і їх осіданню (рис. 4а,б). Ці кристали при повільному охолодженні зростають і формують у донній частині виливка твердо-рідку фазу.

З часом відбувається локалізація окремих об'ємів рідкої фази (рис. 4в), в яких пізніше формуються раковини. Слід зазначити, що вже при невеликій амплітуді вібрації зникає усадкова раковина у тепловому вузлі виливка. Тобто відбувається ущільнення кристалів, що осідають. На вільній поверхні розплаву в цей час формуються і великі за розміром кристали, які поступово опускаються донизу.

Зростання вертикальної вібрації у декілька разів призводить до того, що на початку процесу твердіння виливка при амплітуді збільшеній до 1 та 1,5мм і частоті 50Гц відбувається злам і осідання зростаючих кристалів твердої фази, яка знаходиться на вертикальних поверхнях порожнини форми (рис. 5а). Ці кристали, як і ті, що формуються на поверхні і в об'ємі розплаву, накопичуються під і біля вертикальних поверхонь форми і формують конуси осадження (рис. 5д).

Встановлено, що під впливом вібрації відбувається у кристалізаторі. За рахунок вібрації посилюється перемішування розплаву, інтенсифікуються гідродинамічні процеси, зростає вимушена конвекція, що впливає на форму фронту твердіння розплаву. Розмір і швидкість потоків, що переносять кристали, можуть бути різними і залежать від форми виливка і амплітуди вібрації при сталій частоті. На кінограмі чітко проглядається потік, який переносить кристали, які осідають, і зміна його форми в часі. Фотографії зроблені з кінограм з інтервалом 0,5с (рис. 5б,в,г).

Таким чином твердіння виливка за умов зростання амплітуди вібрації відбувається направлено від низу до верху. Шар твердої фази на вертика-

льних стінках форми росте повільно, але потім ріст прискорюється за рахунок зниження загальної температури системи і осадження кристалів з вільної поверхні розплаву. Найбільш швидко розплаву твердне в западинах форми, оскільки потоки розплаву не виносять з них кристали. А останні тільки осідають на дно западини (рис. 5ж, з). При вібраціях з малою амплітудою при частоті 50Гц усадкова раковина формується під скоринкою затверділої модельної речовини (як аналог містка твердого металу на поверхні при кристалізації злитка). При підвищенні амплітуди вібрації ця скоринка руйнується, великими полікристалами осідає на дно виливка і в результаті формується чітко виражена усадкова раковина у вигляді відкритого конуса (рис. 5к).

Кінетика твердіння тіосульфату при вібрації з амплітудами 1 і 1,5мм відбувається за іншим механізмом. Великий внесок у твердіння дають кристали, що накопичуються під вертикальними границями модельна рідина –форма. Самі виливки у закристалізованому стані мають подрібнену структуру, про що свідчить непрозорість виливка (див рис. 3ж і 5к). Перехід від експоненційної залежності твердіння до степеневі (рис.6) відбувається тому, що загальний напрямок кристалізації змінюється на переважно вертикальний і співпадає з напрямком вібрації.

Висновки

Встановлено, що в умовах експерименту без фізичного впливу на метал твердіння моделі виливка практично за своїм механізмом не відрізняється від твердіння великих злитків, наприклад, злитків сталі у металевих виливницях. У теплових вузлах і біля відкритої поверхні розплаву розташовується усадкова раковини.

При наявності вібрації з невеликою амплітудою коливання (0,25мм, 0,35мм) і частотою 50Гц спостерігається невелике осідання зростаючих кристалів у розплаві і твердий шар у нижній частині виливка наростає швидше. Невелика за амплітудою вертикальна вібрація сприяє відокремленню окремих кристалів від затверділого шару і їх осіданню. При такій вібрації зникає усадкова раковина у тепловому вузлі виливка.

Встановлено, що під впливом вібрації відбувається інтенсифікація гідродинамічних процесів у залитій формі. Твердіння виливка при зростанні амплітуди вібрації переважно відбувається у напрямку вібрації з низу до верху, а не тільки у напрямку тепловідведення. За рахунок появи переважного напрямку твердіння змінюється кінетика процесу і відбувається значне, у рази, прискорення твердіння виливка. Зростання амплітуди вертикальної вібрації до 1 та 1,5мм дозволяє подрібнити макроструктуру виливка.

У цілому одержано позитивний вплив вібрації на виливок, пов'язаний з кінетичними особливостями процесу.

Бібліографічний опис

1. Курдюмов А.В., Пикунов М.В., Чурсин В.М. Литейное производство цветных и редких металлов : уч. пособ. 2-е изд., перераб. и допол. Москва : Metallurgiya, 1982. 352 с.
2. Бондарев Б.И., Напалков В.И., Тарарышкин В.И. Модифицирование алюминиевых деформируемых сплавов : монография. Москва : Metallurgiya, 1979. 224 с.
3. Бибииков А.М., Халтурин И.П., Зарембо В.И.. Управление структурообразованием и свойствами литых материалов слабым акустическим воздействием. *Литейное производство*. 2007. № 5. С. 12-14.
4. Мариенбах Л.М., Соколовский Л.О.. Плавка сплавов цветных металлов для фасонного литья : уч. пособ. Москва : Высшая школа, 1967. 248 с.
5. Максимчук І.М., Хрипливий А.О., Ткаченко В.Г., Фрізель В.В. Вплив електрогідроімпульсної обробки розплаву на процес кристалізації та властивості магнієвого сплаву системи Mg-Al-Ca-Mn-Ti. *Металознавство та обробка металів*. 2012. № 4. С. 10-17.
6. Ефимов В.А., Нурадинов А.С., Эльдарханов А.С.. Влияние вибрационной обработки на структуру и свойства слитка стали 60. *Сталь*. 2002. № 2. С. 15-17.
7. Нурадінов А.С., Ельдарханов А.С., Ноговіцин О.В., Таранов Є.Д.. Вплив вібрації на формування безперервно литої бlyмінгової заготовки. *Металознавство та обробка металів*. 2013. № 3. С. 15-23.

References

1. Kurdyumov A.V., Pikunov M.V., Chursin V.M. Liteynoye proizvodstvo tsvetnykh i redkikh metallov : uch. posob. 2-ye izd., pererab. i dopol. Moskva : Metallurgiya, 1982. 352 s.
2. Bondarev B.I., Napalkov V.I., Tararyshkin V.I. Modifitsirovaniye alyuminiyevykh deformiruyemykh splavov : monografiya. Moskva : Metallurgiya, 1979. 224 s.
3. Bibikov A.M, Khalturin I.P., Zarembo V.I.. Upravleniye strukturoobrazovaniyem i svoystvami litykh materialov slabym akusticheskim vozdeystviyem. Liteynoye proizvodstvo. 2007. № 5. S. 12-14.
4. Mariyebakh L.M., Sokolovskiy L.O.. Plavka splavov tsvetnykh metallov dlya fasonnogo lit'ya : uch. posob. Moskva : Vysshaya shkola, 1967. 248 s.
5. Maksimchuk I.M., Khripliviy A.O., Tkachenko V.G., Frizel' V.V. Vpliv yelektrogidroimpul'snoy obrobki rozplavu na protses kristalizatsii ta vlastivost' magniëvogo splavu sistemi Mg-Al-Ca-Mn-Ti. Metaloznavstvo ta obrobka metaliv. 2012. № 4. S. 10-17.
6. Yefimov V.A., Nuradinov A.S., El'darkhanov A.S.. Vliyaniye vibratsionnoy obrabotki na strukturu i svoystva slitka stali 60. Stal'. 2002. № 2. S. 15-17.
7. Nuradinov A.S., Yel'darkhanov A.S., Nogovitsin O.V., Taranov E.D.. Vpliv v'ibratsii na formuvannya bezperervno litoi blyumingovoi zagotovki. Metaloznavstvo ta obrobka metaliv. 2013. № 3. S. 15-23.

Стаття поступила: 17.06.2019