

УДК 621.744: 539.216

В. Ю. Шейгам, наук. співроб.; e-mail: onmlptima@ukr.net

А. Г. Пригунова, д-р техн. наук, зав. відділу, e-mail: adel_nayka@ukr.net;
ORCID 0000-0001-8030-9160

М. В. Кошелєв, наук. співроб.; e-mail: silica-lum@ukr.net

А. С. Нурадінов, д-р техн. наук, пров. наук. співроб.;
e-mail: nla_73@ukr.net; ORCID 0000-0002-7286-8648

В. М. Дука, мол. наук. співроб.; e-mail: onmlptima@ukr.net

Л. К. Шеневідько, наук. співроб., e-mail: onmlptima@ukr.net

А. Г. Вернидуб, гол. технолог; e-mail: onmlptima@ukr.net

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

УПРАВЛІННЯ СТРУКТУРОЮ ВИЛИВКА ЧЕРЕЗ ВІДКРИТУ ПОВЕРХНЮ НАДЛИВУ

На модельній і металевій системах вивчено можливість управління структурою виливка через відкриту поверхню надливу із застосуванням вібруючого кристалізатора, зануреного в приповерхні шари розплаву в формі з низькими теплофізичними характеристиками. Фізичне моделювання, яке проведено на сплаві органічних речовин: камфен – 90 %, тріціклен – 10 %, дозволило спостерігати і фіксувати зародження, зростання кристалів на нерухомому сталевому кристалізаторі, зануреному на 8–10 мм під дзеркало розплаву. А також зародження, зростання і відрив кристалів від кристалізатора, вібруючого з частотою 50 Гц і амплітудою 0,5 мм, їх осідання на дно форми під дією сили гравітації з утворенням «конусу осадження», що створює відповідні умови для формування дрібнокристалічної структури при твердненні. Перевірку встановлених при фізичному моделюванні закономірностей здійснено на алюмінії марки А7 з використанням аналогічних режимів вібрації та ливарної форми з волограну, теплопровідність якого становить 0,16 Вт/(м·К), теплоємність – 1,185 кДж/(кг·К). Дві серії експериментів, проведені в умовах природного охолодження від температури 670 °С на повітрі з нерухомим і вібруючим кристалізатором, показали, що оброблення тверднучого металу вібруючим кристалізатором сприяє 16-кратному зменшенню розміру макрозерна порівняно з виливками, одержаними при об'ємному твердненні у волограновій формі в разі відсутності кристалізатора. Наявність у розплаві нерухомого кристалізатора призводить до зменшення щільності виливка на 0,42 %, вібруючого – до збільшення його щільності на 1,2 %. Застосування вібруючого кристалізатора забезпечує підвищення міцнісних характеристик у 1,87 рази як при одержанні виливків у волограновій формі без кристалізатора, так і при його нерухомому положенні. Пластичність зразків при цьому підвищується більше, ніж в 3 рази. Результати експериментальних досліджень пояснено з позицій теорії зародження і росту кристалів.

Ключові слова: вібруючий кристалізатор, виливок, зародження і зростання кристалів, розмір зерна, міцність, пластичність.

Вступ

Сучасні способи отримання литих виробів з максимальним подрібненням кристалічної структури передбачають застосування зовнішніх впливів на рідкий та тверднучий метал, серед яких: теплові, барометричні, електромагнітні, гравітаційні,

механічні, високоенергетичні. Незважаючи на широкий спектр способів впливу, досягнення необхідного рівня якості виливків, залежно від їх хімічного складу і технології виготовлення, потребує вирішення низки специфічних завдань. При цьому, як зазначає академік НАН України В. Л. Найдек [1], практично всі фізичні методи обробки є багатоцільовими, але не універсальними.

З точки зору ефективності та економічності виробництва представляє інтерес комбінація методів регульованого тепловідведення і вібраційної низькочастотної обробки, які мають істотний вплив на процеси тверднення. Відомо, що передача імпульсу рідкому або тверднучому металу через стінку ливарної форми пов'язана з енергетичними втратами. Тому найбільш вигідним є спрямування імпульсу безпосередньо до розплаву через занурений в нього вібруючий хвилевід або через хвилевід, який проходить через дно виливниці [2]. Реалізація такого способу дозволяє використовувати його для отримання виливків в піщано-глинистих формах, які легко руйнуються. Тверднення виливків в таких формах супроводжується живленням їх рідким металом з відкритим надливом.

Поряд з віброобробкою форми з рідким або тверднучим металом, оцінка стану і внеску відкритої поверхні рідкого металу у формування структури була предметом уваги багатьох дослідників. Широка дискусія з цього питання була розпочата в 1951 році з публікації в журналі «Сталь» статті С. Я. Скобло і П. М. Донцова [3]. Дослідами на технічному алюмінії авторами встановлено утворення на вільній поверхні металу ізольованих кристалів, які завдяки тому, що їх щільність на 4 % більша, ніж розплаву, опускаються на дно форми з формуванням «конусу осадження». На їхню думку, таке явище має спостерігатися і в злитках спокійної сталі. Можливість переміщення кристалів з головної в донну частину зливка також підтверджено в [4]. В монографії [5, с.122] відзначається, що осадження кристалів супроводжується переохолодженням розплаву уздовж фронту тверднення.

За даними робіт [6–8] частинки твердої фази можуть утворюватися на відкритій поверхні розплаву за такими схемами [7]: а) механічне пошкодження твердої скоринки на поверхні розплаву при розвитку хвильових процесів; б) руйнування вторинних і третинних дендритів. Японський дослідник А. Оно [8], вивчаючи вплив вібрації на процес формування виливків з алюмінію чистотою 99,8 %, робить висновки, що накладення вібрації найбільш ефективно в початковий період тверднення, а формування рівновісних кристалів досягається за рахунок вібрації поверхні розплаву.

Авторами [9, 10] досліджено формування зони осадження кристалів в процесі тверднення при зовнішніх впливах на дзеркало розплаву. Експерименти проводили на модельних розплавах гіпосульфата, алюмінієвого сплаву АЛ2 і бронзи Бр1. Вплив на поверхню розплавів здійснювали сталевим прутиком діаметром 2–3 мм. З періодичністю 60 занурень за хвилину зламували тверду скоринку на поверхні розплаву з подальшим перемішуванням. При обробці розплаву АЛ2 збільшення частоти коливань від 0 до 60 за хвилину призводить до зменшення величини зерна з 0,41 до 0,363 см, а твердість зростає з 57 до 82 HRB. Подальша інтенсифікація процесу не змінює цих показників. Підвищення перегріву з 110 до 190 °С при постійній частоті коливань (60 хв⁻¹) збільшує розмір зерна з 0,34 до 0,40 см. На виливках з олов'яно-свинцевої бронзи Бр1 кульової опори сталерозливочного ковша одержано не тільки подрібнення структури, але й усунення раковин.

У експерименті з моделюючою речовиною камфен, дифеніл, гипосульфит [11] спостерігали ефекти, пов'язані з низькочастотною вібрацією стрижня безпосередньо в розплаві. Спостережуване авторами зародження кристалів починається симетрично від джерела коливань в областях, прилеглих одночасно до кірки, що твердне, і до вільної поверхні розплаву. Процес носить лавинний характер. Дрібнодисперсні кристали заповнюють весь простір, що оточує вібруючий стрижень. Надалі хмара кристалів з'являється під торцем джерела коливань. Наступним етапом процесу є укрупнення, коагуляція їх в нерегулярні конгломерати, з подальшим відривом від

поверхні і переміщенням в напрямку донної частини виливки. Обробку розплаву автори проводили з частотами 16,7; 33,3 і 50 Гц, амплітуда становила 0,5; 1,0 і 2,0 мм. Зміна параметрів коливань впливає, в основному, на тривалість початку появи кристалів і на їх розмір. Установлено, що мінімальний розмір кристалів досягається при обробці розплаву з частотою 50 Гц і амплітудою 0,5 мм.

У монографії [6] описано результати японських фахівців Y. Iton, T. Okijama, K. Tashiro щодо впливу на рідкий метал вібруючих хвильоводів, занурених у розплав на 50–70 мм. Експерименти проводили на сталевих дослідних зливках масою 150 кг і промислових – масою 6 т з метою отримання рівновісної кристалічної структури. Інтенсифікація процесу зародкоутворення при безперервному розливанні сталі зануренням у кристалізатор водоохолоджуваних стрижнів, що коливаються, дозволила авторам [12] одержати промисловий (6 т) зливков з подрібненою структурою і зменшеною зоною стовпчастих кристалів.

Не дивлячись на позитивні результати з обробки розплаву вібруючим холодильником [2, 6, 9–12], застосування даного методу на практиці досить обмежене через недостатню повноту теоретичного та експериментального опрацювання питань щодо впливу низькочастотної вібраційної обробки на рідкий та тверднучий метал. Крім того, використання цих способів стримується технологічними труднощами їх реалізації при отриманні виливків в легкоруйнівних піщано-глинистих формах. Тверднення виливків в таких формах супроводжується живленням їх рідким металом з відкритим надливом. З огляду на вищевикладене, метою роботи є дослідження процесу формування виливків з використанням вібруючого кристалізатора, зануреного під дзеркало розплаву в формі з низькими теплофізичними характеристиками та відкритою поверхнею надливу.

Матеріали та методи досліджень. Фізичне моделювання процесів кристалізації розплавів проведено на сплаві органічних речовин: камфен – 90 %, тріціклен – 10 %, з використанням лабораторного стенду, який забезпечує низькочастотну вібрацію кристалізатора в напрямі вертикальної вісі порожнини форми. Для візуалізації процесів тверднення на модельному розплаві використано форму з пласкопаралельними прозорими стінками зі скла. Мідні бічні стінки і низ форми з системою каналів термічної стабілізації забезпечують ізотермічність робочого простору $\pm 1^\circ\text{C}$ в інтервалі температур від 35 до 60 $^\circ\text{C}$. Як кристалізатор використано сталевий стрижень діаметром 10 мм з конічною (3^о) ділянкою довжиною 8–10 мм, яку занурювали під дзеркало розплаву. Дослідження проведено при нерухомому кристалізаторі та при його низькочастотній вібрації кристалізатора з частотою 50 Гц і амплітудою 0,5 мм.

Експерименти на металі виконано на алюмінії марки А7 (ДСТУ 11069–2003) наступного складу, %мас.: Fe – 0,15; Si – 0,14; Zn – 0,03; Al – решта. Як матеріал форми використано розроблений у Фізико-технологічному інституті металів і сплавів НАН України вогнетривкий матеріал – вологран [13, 14], теплопровідність якого становить 0,16 Вт/(м·К), теплоємність – 1,185 кДж/(кг·К). Внутрішня конусоподібна порожнина форми має розміри: $\varnothing 60 \times \varnothing 70 \times 70$ мм, товщина стінки форми – 25 мм, вага виливка алюмінію – приблизно 500 г.

Вологранову форму встановлювали в лабораторну піч опору. В формі розміщували дві термопари. Одну на відстані 35 мм від днища форми, іншу – на глибині 4–5 мм від поверхні форми на відстані 3–4 мм від кристалізатора. Контроль і запис змін температури зразка, що твердне, здійснювали за допомогою хромель-алюмелевих термододів, підключених через АЦП до персонального комп'ютера.

Метал плавив в печі опору. При нагріванні розплаву до температури $780 \pm 5^\circ\text{C}$ його рафінували флюсом Арсан 2125 із розрахунку 0,2 % від маси металу, витримували в печі протягом 10 хв і переливали в порожнину вологранової форми, нагрітої до $770 \pm 5^\circ\text{C}$. При зниженні температури розплаву і форми до $670 \pm 5^\circ\text{C}$ піч, в якій знаходилася форма, вимикали. Тверднення металу в формі відбувалося разом з піччю на повітрі, з переважаючим охолодженням розплаву через відкриту поверхню форми.

У такій же послідовності проводили експерименти з використанням нерухомого та вібруючого кристалізатора. Для запобігання розчинення сталевого кристалізатора в алюмінії на контактуючу з рідким металом частину кристалізатора наносили шар фарби на основі колоїдального графіту. При температурі металу в формі 670 ± 5 °C під дзеркало розплаву на глибину 8–10 мм занурювали нерухомий або вібруючий кристалізатор. Режими вібраційної обробки (частота 50 Гц, амплітуда 0,5 мм) і тип кристалізатора були такими ж, як і в експериментах з модельним сплавом.

Макроструктуру осьового перерізу дослідних виливків виявляли після глибокого травлення протягом 15–20 хв у реактиві Келлера: HF – 1 мл, HCl – 1,5 мл, HNO₃ – 2,5 мл, H₂O – 95 мл. Визначали середні розміри макрозерна, їх максимальні та мінімальні значення у верхніх, середніх і нижніх зонах зразка.

З огляду на те, що верхня частина дослідних виливків при твердненні виконує роль живильного надливу по відношенню до її донної частини, кількісні характеристики мікроструктури, щільність і механічні властивості визначали по їх нижній частині. Вимірювання щільності виливків проводили методом гідростатичного зважування згідно з ГОСТ 20018-74. Межа міцності на розрив σ_B (МПа) і відносне видовження δ (%) визначали за ДСТУ ISO 6892-1:2019 на зразках діаметром 8 мм.

Результати та їх обговорення. На рис. 1 представлено фрагменти фізичного моделювання процесів кристалізації попередньо перегрітого на $2 \pm 0,8$ °C сплаву камфена (90 %) з тріцікленом (10 %), температура ліквідус якого дорівнює 45 °C.

При зануренні в модельний розплав нерухомого кристалізатора, при кімнатній температурі спостерігається яскраво виражене направлене зростання кристалів та їх конгломератів на поверхні кристалізатора, що контактує з розплавом (рис. 1, а). При використанні вібруючого кристалізатора (рис. 1, б) зростаючі на його поверхні кристали відриваються, утворюючи безперервний потік в об'ємі розплаву і безперервне збільшення насипного конусу з цих кристалів. При горизонтальному переміщенні кристалізатора потік кристалів утворює доріжку і «конус осадження» на новому місці. Внаслідок генерування великої кількості кристалів, що зриваються з вібруючого кристалізатора, відбувається повне заповнення об'єму форми дрібними кристалами, які виконують роль численних зародків кристалізації. Оскільки їх зростання обмежене, утворюється дрібнозерниста однорідна структура, що підтверджено дослідженнями, проведеними на металі – алюмінії.

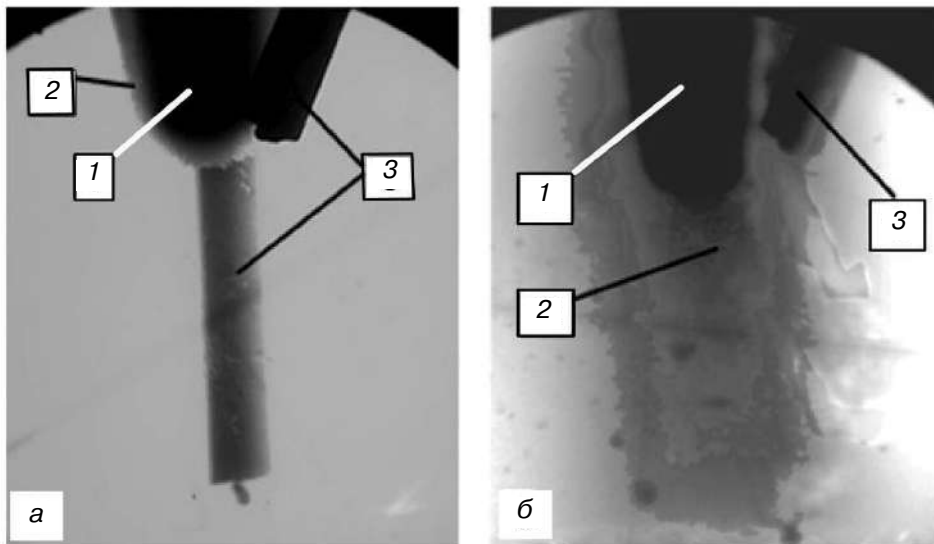


Рис. 1. Зміна характеру кристалізації сплаву камфена з тріцікленом при введенні до розплаву нерухомого (а) і вібруючого (б) кристалізатора: 1 – кристалізатор; 2 – кристали модельної речовини; 3 – термопар

Отримані в експериментах з різними умовами тверднення криві охолодження розплаву алюмінію (рис. 2) показали, що введення під дзеркало розплаву як нерухомого (рис. 2, криві 3, 4), так і вібруючого кристалізатора (рис. 2, криві 5, 6) різко змінюють умови охолодження в формі (рис. 2, криві 1, 2). Збільшується швидкість його охолодження над лінією ліквідус, скорочується час процесу тверднення.

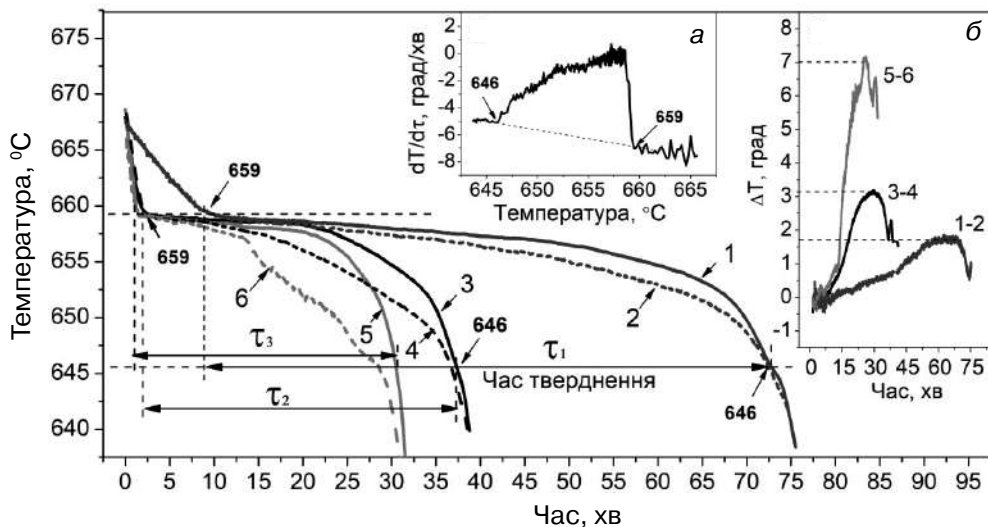


Рис. 2. Криві охолодження алюмінію А7 у волограновій формі, отримані для різних умов тверднення металу: 1, 2 – форма без кристалізатора; 3, 4 – форма з нерухомим кристалізатором; 5, 6 – форма з вібруючим кристалізатором. На вкладках: а – диференціальна крива визначення температурного інтервалу тверднення виливка, б – зміна осьового перепаду температур у формі при різних умовах тверднення металу

Для підвищення точності визначення часу і температурного інтервалу тверднення виливків здійснено диференціювання кривих охолодження (рис. 2, вкладка а). Введення під дзеркало розплаву нерухомого кристалізатора майже вдвічі (в 1,97 рази) скорочує час тверднення в формі, призводить до істотного (в 5,25 рази) зростання швидкості охолодження розплаву над лінією ліквідус (з 0,96 до 5,04 °C/хв). При вібрації кристалізатора швидкість охолодження розплаву над лінією ліквідус зростає до 7,3 °C/хв. Причому час тверднення скорочується в 1,25 рази порівняно з нерухомим кристалізатором і у 2,47 рази порівняно з твердненням у формі без кристалізатора.

Перепад температур у процесі тверднення, ΔT (рис. 2, вкладка б), по висоті виливка визначали за різницею показань термопар відповідних кривих охолодження. На початковому етапі охолодження, після проходження температури ліквідус, вимірювана різниця температур є мінімальною. Зі збільшенням відносного обсягу твердої фази в металі, що твердне, спостерігається зростання величини перепаду температур в формі. Найбільш високий ступінь перепаду температур припадає на заключну стадію процесу тверднення, що обумовлено зростанням термічного опору в кристалічній фазі. Якщо занурення у приповерхневі шари розплаву нерухомого кристалізатора призводить до зростання перепаду температур в формі в 1,85 раз, то при використанні вібруючого кристалізатора його значення збільшується в 4,25 разів.

Макроструктуру алюмінієвих зразків, отриманих у волограновій формі при різних умовах тверднення металу, зображено на рис. 3.

Дослідження макроструктури виливка по висоті свідчать про практично рівномірний розподіл кристалів у формі з вібруючим кристалізатором. Порівняння результатів щодо розмірів макрозерна у виливках (табл. 1), отриманих в умовах обробки тверднучого металу вібруючим кристалізатором, з результатами за умо-

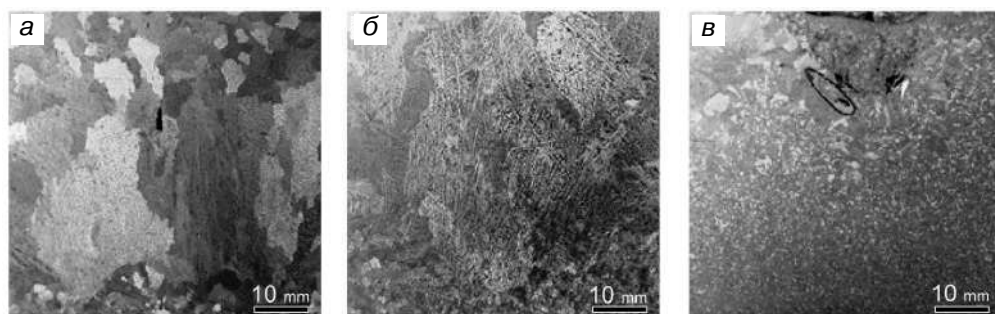


Рис. 3. Макроструктура алюмінієвих зразків, отриманих у волограновій формі при різних умовах тверднення металу: а – форма без кристалізатора; б – форма з нерухомим кристалізатором; в – форма з вібруючим кристалізатором

Таблиця 1

Параметри макроструктури зразків

Умови тверднення у волограновій формі	Розмір макрозерна	Розмір зерен по висоті зразка, мм		
		верх	середина	низ
1. Без кристалізатора	середні	4,7	8	2,4
	максимальні	10,3	32,7	6,3
	мінімальні	1,4	1,7	1,3
2. При нерухомому кристалізаторі	середні	5,4	8,8	2,1
	максимальні	20,2	16,8	4,4
	мінімальні	2,0	2,8	0,7
3. При аксіально вібруючому кристалізаторі	середні	2,9	0,5	0,4
	максимальні	6,8	1,6	0,8
	мінімальні	1,1	0,3	0,2

ви його відсутності, свідчать, що розмір макрозерна у верхній, середній і нижній частині зразка зменшуються відповідно у 1,62; 16,0 і 6 разів. Максимальні розміри зерна зменшуються в 1,5; 20,4 і 7,9 рази, а мінімальний розмір зерна зменшуються в 1,3; 5,7 і в 6,5 разів. Використання вібруючого кристалізатора, порівнюючи з нерухомим, зменшує розмір макрозерна у верхній, середній і нижній частинах зразка в 1,86; 17,6 і 5,25 разів відповідно. Максимальний розмір зерна зменшується в 2,97; 10,5 і 5,5 раз, а їх мінімальний розмір зменшується відповідно у 1,82; 9,3 і в 3,5 рази.

З огляду на те, що верхня частина зразків при твердненні виконує функцію живильного надливу по відношенню до його донної частини, на рис. 4 представлено гістограму розподілу розміру зерен в донній частині виливків. З гістограми видно, що мінімальне значення розміру зерна у виливку (~ 400 мкм) отримано в умовах оброблення тверднучого металу вібруючим кристалізатором. Проте дослідження макроструктури виливка по висоті свідчать, що вона представлена як великими зернами, розмір яких досягає 800 мкм, так і дрібними зернами з розмірами близько 200 мкм і менше.

Використовуючи результати термічного і металографічного аналізу виливків, процес кристалізації кількісно можна описати наступними параметрами: швидкістю зародження центрів кристалізації n ($1/\text{м}^3 \cdot \text{г}$) і лінійною швидкістю їх росту c (м/г), взаємозв'язок яких розглянуто в роботах [2, 15, 16]. Якщо допустити, що кристали, які формуються, мають сферичну симетрію, то ці параметри можна визначити за формулами [2]:

$$n = \frac{3,1}{t_3 \cdot d_{\text{cp}}^3}, \quad c = 1,124 \frac{d_{\text{cp}}}{t_3},$$

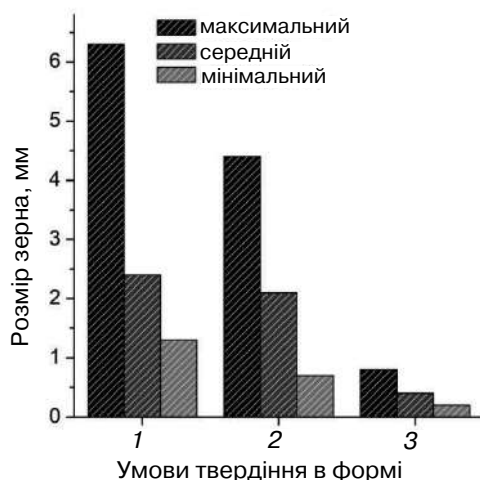


Рис. 4. Гістограми розподілу розмірів макрозерна в донній частині виливків, отриманих в різних умовах тверднення: 1 – форма без кристалізатора; 2 – форма з нерухомим кристалізатором; 3 – форма з вібруючим кристалізатором

кристалізатором і розплавом. При зануренні в розплав вібруючого кристалізатора зростають на ньому великі дендрити відчують знакозмінні навантаження. Це призводить до їх механічного руйнування і виникненню уламків кристалів, які мають більшу щільність порівняно з рідким металом. При вимушеній конвекції вони потрапляють у ділянки розплаву з температурою, що дозволяє їм зберегтися і рости до стійких розмірів. Тоді як дрібні уламки дендритів розплавляються, що викликає додаткове охолодження рідкого металу і зростання інтенсивності відводу тепла. При цьому фактичне переохолодження поблизу фронту тверднення розплаву приводить до збільшення швидкості зародження центрів кристалізації та до зменшення розміру зерна.

Структурні особливості виливків взаємопов'язані з їх фізичними та механічними властивостями. Як видно з рис. 5, щільність зразка № 2, одержаного з використанням нерухомого кристалізатора, нижче, ніж у зразка № 1, отриманого без кристалізатора, а використання вібруючого кристалізатора (зразок 3) забезпечує найбільше підвищення щільності металу. Щільність зразка в присутності нерухомого кристалізатора

де: t_3 – час повного тверднення металу, г;
 d_{cp} – середній розмір зерна в розглянутому обсязі металу, м.

Дані розрахунків за вище наведеними формулами представлено в табл. 2.

З табл. 2 видно, що вібраційне оброблення розплаву, який твердне, призводить до збільшення (~ 1000 разів) швидкості зародження центрів кристалізації і зменшення (~ у 3,5 рази) швидкості росту кристалів. Як наслідок, це забезпечує формування дрібнозернистої структури. Треба думати, що основними чинниками таких структурних змін, перш за все, є використання форм з низькими теплофізичними характеристиками за умови їх нагріву до температури рідкого стану металу. Це дозволяє розширити часовий інтервал активного впливу вібрації, підвищення її ефективності. Відбувається формування кристалічного шару на поверхні кристалізатора, чому сприяє відвід тепла, обумовлений доволі великим перепадом температур між

Таблиця 2

Параметри кристалізації алюмінію А7 в донній частині виливків, отриманих в різних умовах тверднення

Умови тверднення в формі	Середній розмір зерна d_{cp} , м	Час повного тверднення виливка T_3 , г	Швидкість зародження центрів кристалізації n , 1/(м ³ ·г)	Лінійна швидкість зростання кристалів C , м/г
1	0,00333	1,06129716	$7,88658 \cdot 10^7$	0,00353
2	0,0024	0,58620558	$3,82541 \cdot 10^8$	0,0046
3	$4,66667 \cdot 10^{-4}$	0,48518772	$6,28683 \cdot 10^{10}$	0,00108

Примітка: 1 – тверднення без кристалізатора; 2 – тверднення з нерухомим кристалізатором, 3 – тверднення з вібруючим кристалізатором

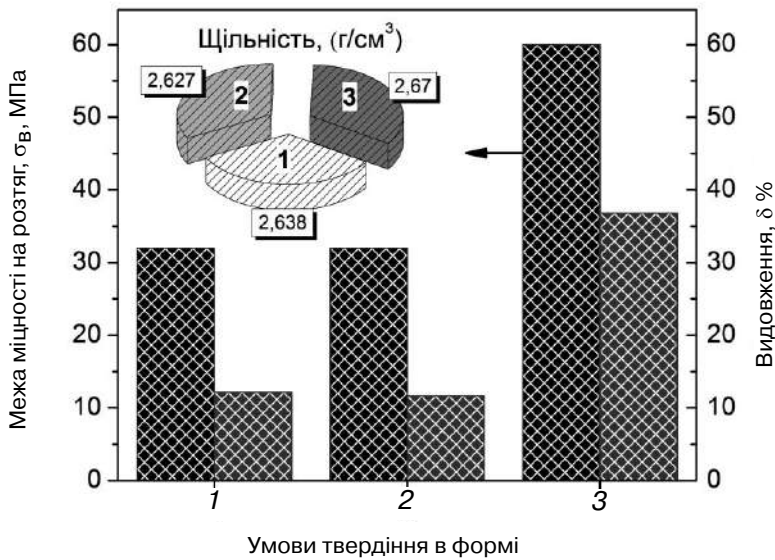


Рис. 5. Щільність і механічні властивості зразків у литому стані, отриманих в різних умовах тверднення: 1 – форма без кристалізатора; 2 – форма з нерухомим кристалізатором; 3 – форма з вібруючим кристалізатором

зменшується на 0,42 %, а при наявності вібруючого кристалізатора збільшується на 1,2 % порівняно з твердненням у волограновій формі без кристалізатора. Разом з цим, в 1,87 рази підвищується і їх короточасна міцність як у порівнянні зі зразками, отриманими при твердненні в волограновій формі без кристалізатора, так і зразка, який сформувався в процесі тверднення з нерухомим кристалізатором. Пластичність зразка № 3 при цьому підвищується більше, ніж в 3 рази.

Таким чином, використання вібруючого кристалізатора, зануреного під дзеркало розплаву через відкриту поверхню форми з низькими теплофізичними характеристиками, призводить до генерації та рівномірного розподілу дрібних кристалів, збільшення центрів кристалізації. Це зумовлює подрібнення кристалічної структури, підвищення щільності і механічних властивостей литих виробів.

Список літератури

1. Найдек В. Л. Процессы внеагрегатной обработки литейных расплавов массового использования. Сучасне матеріалознавство XXI сторіччя. К.: Наукова думка. 1998. С. 133–134.
2. Баландин Г. Ф. Формирование кристаллического строения отливок. М.: Машиностроение, 1973. 288 с.
3. Скобло С. Я., Донцов П. М.. Механизм образования конуса осаждения в слитке. *Сталь*. 1951, № 6. С. 534–543.
4. Колясников М. П. Изучение проникновения утепляющих засыпок в тело слитка с помощью меченых атомов. *Сталь*. 195С, № 12. С. 1130–1133.
5. Скребцов А. М. Конвенция и кристаллизация металлического расплава в слитках и отливках. М.: Металлургия, 1993. 144 с.
6. Ефимов В. А., Эльдарханов А. С. Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов. М.: Металлургия, 1995. 272 с.
7. Смирнов А. М., Пилюшенко В. Л., Момот С. В., Амитан В. Н. Затвердевание металлического расплава при внешних воздействиях. Донецк: Издательство «ВИК». 2002, 169 с.

- 8 Оно А. Затвердевание металлов. М.: Metallurgy, 1980, 152 с.
- 9 Скребцов А. М., Дан Л. А., Килочкин В. В. Исследование воздействий на свободную поверхность затвердевающей отливки или слитка. Известия высших учебных заведений. *Черная металлургия*, 1995, № 9. С. 54–57.
- 10 А.с. СССР 1764781 МКИ В22Д 7/00. Скребцов А. М., Дан Л. А., Килочкин В. В., Павлюк Б. А. Открытия. Изобретения. 1992, № 36.
- 11 Вишкарёв А. Ф., Кряковский Ю. В., Панкратов О. С., Сафронов А. А., Чухлов В. И. Низкочастотное вибровоздействие на кристаллизующийся расплав в модельном эксперименте. Известия вузов. *Черная металлургия*. 1986. № 3. С. 42–47.
- 12 Скворцов А. А., Акименко А. Д., Ульянов В. А. Влияние внешних воздействий на процесс формирования слитков и заготовок. Москва: Metallurgy. 1991. 216 с.
- 13 Пужайло Л. П., Блохина С. В., Прохоренко Л. Н. Исследование теплофизических и эксплуатационных свойств вологран – нового материала для футеровки МДН. Применение магнитодинамических установок в литейном производстве. Тезисы республиканского семинара. Уфа. Изд. Башкирский областной совет НТО. 1980. С. 105–107.
- 14 А.с. № 669710 *Огнеупорный материал*. Пужайло Л. П., Полищук В. П. Оpubл. 15.06.81, Бюл. № 22.

Надійшла 26.10.2021

References

- 1 Naydek V. L. (1998). Processes of out-of-unit processing of casting melts of mass use. Suchasne materialoznavstvo XXI storichchya. Kiev: Naukova Dumka, pp. 133–134. [in Russian].
- 2 Balandin G. F. (1973). Formation of the crystallite structure of castings. Moscow: Mashinostroenie, 288 p. [in Russian].
- 3 Skoblo S. Ya., Dontsov P. M. (1951). The mechanism of formation of the deposition cone in the ingot. *Steel*, no. 6, pp. 534–543. [in Russian].
- 4 Kolyasnikov M.P. (1950). Study of the penetration of insulating backfills into the body of an ingot using labeled atoms. *Steel*, no. 12, pp. 1130–1133. [in Russian].
- 5 Skrebtsov A. M. (1993). Convention and crystallization of metal melt in ingots and castings. Moscow: Metallurgy, 144 p. [in Russian].
- 6 Efimov V. A., Eldarkhanov A. S. (1995). Physical methods of influence on the processes of solidification of alloys. Moscow: Metallurgy, 272 p. [in Russian].
- 7 Smirnov A. M., Pilyushenko V. L., Momot S. V., Amitan V. N. (2002). Solidification of a metal melt under external influences. Donetsk: Publishing house "VIK", 169 p. [in Russian].
- 8 Оно А. (1980). Solidification of metals. Moscow: Metallurgy, 152 p. [in Russian].
- 9 Skrebtsov A.M., Dan L.A., Kilochkin V.V. (1995). Investigation of the effects on the free surface of a solidifying casting or ingot. News of higher educational institutions: *Ferrous metallurgy*, no. 9, pp. 54–57. [in Russian].
- 10 A.S. USSR 1764781 МКИ В22Д 7/00 Skrebtsov A. M., Dan L. A., Kilochkin V. V., Pavlyuk B. A. Discoveries. Inventions: 1992, Bull. no. 36. [in Russian].
- 11 Vishkarev A. F., Kryakovskiy Yu. V., Pankratov O. S., Safronov A. A., Chukhlov V. I. (1986). Low-frequency vibration action on a crystallizing melt in a model experiment. *Izvestiya vuzov: Ferrous metallurgy*, no. 3, pp.42–47. [in Russian].
- 12 Skvortsov A. A., Akimenko A. D., Ulyanov V. A. (1991). The influence of external influences on the process of forming ingots and billets. Moscow: Metallurgy, 216 p. [in Russian].
- 13 Puzhailo L. P., Blokhina S. V., Prokhorenko L. N. (1980). Investigation of thermophysical and operational properties of vologran – a new material for lining MDN / Application of magnetodynamic installations in foundry production. Theses of the republican seminar. Ufa: Ed. Bashkir Regional Council of NTO, pp. 105–107. [in Russian].
- 14 A.S. no. 669710 *Refractory material*. Puzhailo L.P., Polishchuk V.P. Publ. 06/15/81, Bull. no. 22 [in Russian].

Received 26.10.2021

V. Yu. Sheigam, Research Scientist; e-mail: onmlptima@ukr.net

A. G. Prigunova, Dr. Sci. (Engin.); e-mail: adel_nayka@ukr.net;

ORCID 0000-0001-8030-9160

M. V. Kosheliev, Research Scientist; e-mail: silica-lum@ukr.net

A. S. Nuradinov, Dr. Sci. (Engin), Leading Research Scientist;

e-mail: nla_73@ukr.net; ORCID 0000-0002-7286-8648

V. M. Duka, Junior Researcher; e-mail: onmlptima@ukr.net

L. K. Shenevidko, Research Scientist; e-mail: onmlptima@ukr.net

A. G. Vernydub, Chief Tehnologist; e-mail: onmlptima@ukr.net

Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

CONTROL OF CASTING STRUCTURE THROUGH OPEN SURFACE PROFITS

On the model and metal systems, the possibility of controlling the structure of the casting through the open surface of the riser with the use of a vibrating crystallizer immersed in the near-surface layers of the melt in a mold with low thermophysical characteristics has been studied. Physical modeling carried out on an alloy of organic substances: camphene – 90 %, tricycline – 10 %, made it possible to observe and fix the nucleation, growth of crystals on a stationary steel mold, immersed 8-10 mm under the mirror of the melt. As well as the nucleation, growth and separation of crystals from a crystallizer vibrating with a frequency of 50 Hz and an amplitude of 0.5 mm, and their settling to the bottom of the mold under the action of gravity with the formation of a "cone of deposition", due to which the appropriate conditions are created for the formation of a fine-crystalline structure at solidification. The verification of the regularities established during physical modeling was carried out on aluminum grade A7 using similar vibration modes and a casting mold made of vologran, the thermal conductivity of which is 0,16 W/(m·K), the heat capacity is 1,185-103 J/(kg·K). Two series of experiments carried out under conditions of natural cooling from a temperature of 670 °C in air with a stationary and vibrating crystallizer, showed that the treatment of the solidifying metal with a vibrating crystallizer promotes a 16-fold decrease in the average size of macrograins in comparison with castings obtained by volumetric solidification in the Vologran mold. in the absence of a crystallizer. The presence of an immovable crystallizer in the melt leads to a decrease in the density of the lower part of the casting by 0.42 %, while a vibrating one leads to an increase in its density by 1.2 %. The use of a vibrating mold provides an increase in strength characteristics by a factor of 1.87 both when receiving castings in a Vologran mold without a mold, and when it is stationary. In this case, the plasticity of the samples increases by more than 3 times. The results of experimental studies are explained from the standpoint of the theory of nucleation and growth of crystals.

Keywords: vibrating crystallizer, casting, nucleation and growth of crystals, grain size, strength, plasticity.