

Г. П. Борисов, В. М. Дука

**Влияние структурного состояния алюминиевых расплавов в  
предкристаллизационной температурной области на процессы их  
затвердевания (обзор)**

**Резюме**

В работе с позиций квазикристаллической модели структуры расплавов рассмотрены вопросы эволюции структурного состояния алюминиевых расплавов в предкристаллизационной температурной области и их взаимосвязь с процессом затвердевания. Показано, что с понижением температуры существует последовательный переход квазидвухфазных сплавов из одного структурного состояния в другое, что закономерно влияет на процессы последующего зародышеобразования и роста кристаллов.

G. P. Borisov, V. M. Duka

**Influence of structural condition of aluminium melts in precrystallizing  
temperature area on processes of their solidification**

**Summary**

In the work from the positions of quasi-crystal melt structure model evolution of a structural condition of aluminium melts in precrystallizing temperature area and its interrelation with process of solidification are studied. It is shown, that there is a consecutive transition of quasi-two-phase alloys with decreasing temperature from one structural condition to another, and it naturally influences to the processes of the subsequent nucleation and growth of crystals.

УДК 621.74.047:62-412:594.1

*Вплив вібрації на формування  
безперервнолитої алюмінігової заготовки*

А. С. Нурадіннов, доктор технічних наук  
А. С. Ельдарханов\*, доктор технічних наук  
О. В. Ноговіцин, доктор технічних наук  
Є. Д. Таранов, кандидат технічних наук

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ  
\*Науковий центр «Новітні матеріали та технології», Москва

*На модельному матеріалі (камфен з трицикленом) досліджено вплив вібрації на формування безперервнолитої заготовки. Встановлено, що під впливом вібрації відбувається інтенсифікація гідродинамічних і теплообмінних процесів як у кристалізаторі, так і в зоні вторинного охолодження. Показано взаємозв'язок зазначених процесів з формуванням первинної структури заготовок.*

**Н**айважливішим завданням сучасної технології лиття металів з використанням машин безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) є

вдосконалення існуючих технологічних процесів з метою підвищення якості кінцевої продукції [1, 2]. Вирішити це завдання можна шляхом розробки і впровадження ефективних способів зовнішніх впливів на заготовку в процесі її формування в МБЛЗ. До числа таких способів відноситься електромагнітне і газоімпульсне перемішування, а також вібрація металу на різних стадіях формування безперервнолитих заготовок [1 – 4].

Більшість дослідників пов'язують виникнення зовнішніх і внутрішніх дефектів безперервнолитих заготовок з гідродинамічними і теплофізичними процесами, що відбуваються в рідкій лунці розплаву металу в кристалізаторі і зоні вторинного охолодження [1 – 4]. Проведення натурних досліджень вказаних процесів при безперервному розливанні металів вельми проблематично і вимагає значних матеріальних витрат. Тому ці процеси вивчалися методом фізичного моделювання (камфен з трицикленом), а в якості зовнішнього впливу на заготовку в процесі її формування була обрана вібрація.

Для проведення досліджень використано експериментальну установку (рис. 1). Головним елементом установки є модель, поперечний переріз якої в масштабі 1:4 відповідає перетину реальної заготовки 410 x 500 мм. Модель розділена на дві рівні частини, при цьому висота кожної з них відповідає висоті кристалізатора реальної МБЛЗ в масштабі 1:4. Для візуалізації процесів, що відбуваються, широкі стінки кристалізатора виготовлені зі скла.

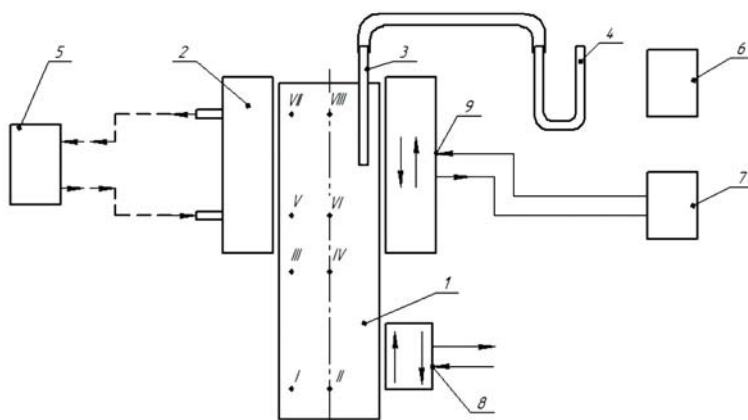


Рис. 1. Експериментальна установка для фізичного моделювання процесів формування алюмінієвої заготовки. 1 – заготовка, 2 – кристалізатор, 3 – трубка для фіксації напору, 4 – U-подібний водяний манометр, 5 – термостат, 6 – цифровий потенціометр, 7 – блок живлення вібратора, 8, 9 – місця підведення віброімпульсу, I, II – VIII – термопари.

В якості постійних технологічних параметрів безперервного лиття у всіх експериментах були обрані:

- температура перегріву і заливки розплаву (51 і 47 °С відповідно),
- швидкість витягування заготовки (3,5 см/хв),
- витрата води на кристалізатор (7 л/хв),
- температура води на вході до кристалізатора (20 °С).

В якості змінюваних технологічних параметрів були обрані: параметри вібрації (амплітуда і частота), місце підведення і напрям віброімпульсу.

Експерименти проводили в такій послідовності: розплав заливали в кристалізатор при температурі 47 °С, що відповідає температурі розливання сталі згідно обраного температурного масштабу; потім з інтервалом 4 хвилини вимірювали параметри кристалізації заготовки (1), фіксували температуру по перерізу і висоті заготовки за допомогою термопар і цифрового потенціометра (6); здійснювали реєстрацію руху розплаву за допомогою трубки (3) і U-подібного водяного манометра (4); нагрівання та охолодження кристалізатора (2) здійснювали термостатом (5); віброімпульси підводили до кристалізатора і до самої заготовки в точках (8 і 9), а параметри вібрації регулювали за допомогою блоку живлення (7).

У ході експериментів визначали:

- градієнт температур по перетину і висоті заготовки;
- температуру охолоджуючої води на виході з кристалізатора;
- розподіл полів швидкостей в рідкій ванні розплаву;
- товщину твердої фази і глибину рідкої лунки;
- кінцеву структуру заготовки.

У кристалізаторі формується первинна оболонка заготовки, товщина якої залежить від теплових та гідродинамічних процесів, що відбуваються в кристалізаторі. Вона повинна забезпечити достатню міцність, щоб протистояти гідростатичному напорові рідкої фази і силам тертя між оболонкою і стінками кристалізатора. Тому на початковому етапі досліджень вивчали розподіл температур і полів швидкостей руху розплаву у кристалізаторі.

Розподіл температур по перетину заготовки контролювали за допомогою термопар (I – VIII, рис. 1). Чотири термопари були встановлені по осі заготовки, а чотири – на відстані 12 мм від її поверхні.

Для вивчення розподілу швидкостей в рідкій лунці використовували методику [5, 6], що здійснює реєстрацію руху розплаву за принципом трубки Піто. Щоб отримати найбільш повну картину розподілу швидкостей розплаву по перетину рідкої лунки в експериментах здійснювали вимірювання у вертикальній і горизонтальній площинах (рис. 2). При цьому для дослідження швидкості руху розплаву в горизонтальній площині використовували трубку з патрубком (4), зігнутих під кутом 90°, а у вертикальній

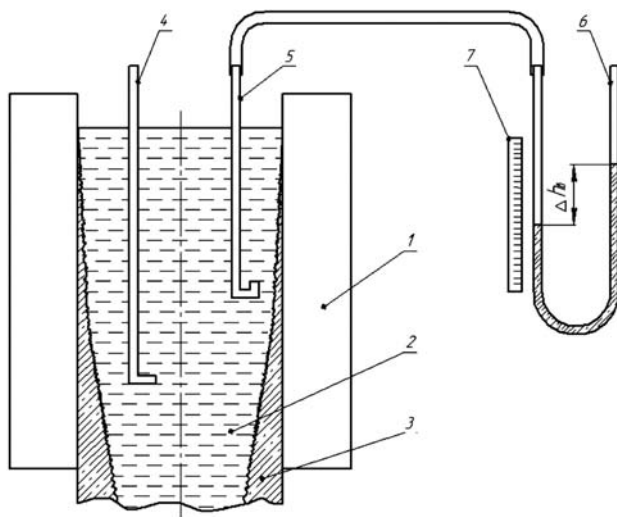


Рис. 2. Схема пристрою для фіксації руху розплаву в рідкій лунці. 1 – кристалізатор, 2 – розплав, 3 – затверділа кірка заготовки, 4 і 5 – вимірювальні трубки, 6 – водяний манометр, 7 – шкала вимірювань.

площині – трубку з патрубком (5), зігнутим під кутом  $180^\circ$ . Вимірювання проводили від осі до поверхні заготовки і від нижнього рівня кристалізатора до вільної поверхні розплаву.

Швидкість руху розплаву в рідкій лунці прямо пропорційна створюваному ним на торці вимірювальної трубки надмірному тиску. Спрощена залежність швидкісного напору розплаву для нашого випадку має наступний вигляд [7]:

$$h = V^2 / 2g, \quad (1)$$

де  $h$  – висота підйому розплаву у вимірювальної трубки, м,  
 $V$  – швидкість руху розплаву в конкретній точці розплаву, м/с,  
 $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>.

Крім того, висота підйому розплаву у вимірювальної трубки залежить від гідростатичного тиску і щільності розплаву:

$$h = P / \rho g, \quad (2)$$

де  $P$  – гідростатичний тиск розплаву, Па,  
 $\rho$  – щільність розплаву, кг/м<sup>3</sup>.

Виходячи з рівності (1) і (2) і на підставі рівняння Бернуллі з урахуванням поправочного коефіцієнта  $\xi$  (для нестисливої рідини  $\xi = 1$ ) [8], швидкість руху розплаву можна визначити по залежності

$$V^2 = \pm 2P / \rho, \quad (3)$$

де  $\pm$  вказують на напрям руху розплаву.

Таким чином, за показаннями водяного манометра можна розрахувати швидкість руху розплаву в будь-якій точці рідкої лунки в кристалізаторі моделі. Напрямок руху розплаву визначали напрямком підйому (+) або втягування (-) стовпа рідини у водяному манометрі.

Щоб оцінити фізичну сутність впливу вібрації на теплофізичні умови формування заготовок, розглянемо елементарний тепловий баланс обсягу металу, що знаходиться в кристалізаторі, за час проходження від меніска до його нижнього зрізу для стаціонарних умов, тобто без зовнішніх впливів. Маса цього металу може бути визначена по залежності:

$$m_{\text{кр.}} = Sh_a \rho, \quad (4)$$

де  $m_{\text{кр.}}$  – маса металу в кристалізаторі, кг,  
 $S$  – площа поперечного перерізу кристалізатора, м<sup>2</sup>,  
 $h_a$  – активна висота кристалізатора, м,  
 $\rho$  – щільність металу в кристалізаторі, кг/м<sup>3</sup>.

## Плавлення і кристалізація

Відведене від кристалізатора водою тепло можна визначити:

$$Q_{\text{кр.}} = G_{\text{в}} C_{\text{в}} \Delta t \tau, \quad (5)$$

де  $Q_{\text{кр.}}$  – тепло, що відводиться охолоджуючою водою в кристалізаторі, кДж,

$G_{\text{в}}$  – витрата води на кристалізатор, л/хв.,

$\Delta t$  – перепад температури води на виході і вході в кристалізатор, °С,

$\tau$  – час перебування металу в кристалізаторі при його проходженні від меніска до нижнього зрізу, хв.

З іншого боку відведене від кристалізатора тепло  $Q_{\text{кр.}}$  витрачається на зняття тепла перегріву металу і формування затверділої оболонки заготовки:

$$Q_{\text{кр.}} = m_{\text{кр.}} C_{\text{ж}} (t_{\text{пк}} - t_{\text{л}}) + m_{\text{об}} C_{\text{м}} (t_{\text{л}} - t_{\text{об}}), \quad (6)$$

де  $C_{\text{ж}}$  і  $C_{\text{м}}$  – теплоємності рідкого і твердого металів, кДж/кг °С,

$t_{\text{пк}}$ ,  $t_{\text{л}}$  – температури розливання і ліквідусу металу, °С,

$t_{\text{об}}$  – середня температура затверділої оболонки, °С,

$m_{\text{об}}$  – маса затверділої оболонки металу, кг.

Враховуючи вищевикладене, рівняння теплового балансу кристалізатора для розглянутої маси металу  $M_{\text{кр}}$  може бути представлено в наступному вигляді:

$$m_{\text{об}} [q + C_{\text{ж}} (t_{\text{пк}} - t_{\text{л}}) + C_{\text{м}} (t_{\text{л}} - t_{\text{об}})] + n Q_{\text{н}} = G_{\text{в}} C_{\text{в}} \Delta t \tau, \quad (7)$$

де  $q$  – питома теплота плавлення металу, кДж/кг,

$Q_{\text{н}}$  – теплота перегріву металу, кДж,

$n = 0,25$ , коефіцієнт, що враховує тепло перегріву.

Крім цього, знаючи величину тепла, що відводиться від кристалізатора, можна визначити середнє значення коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha_{\text{кр}}$  від розплаву до його стінок:

$$\alpha_{\text{кр}} = Q_{\text{кр}} / F_{\text{кр}} \Delta t, \quad (8)$$

де  $\alpha_{\text{кр}}$  – коефіцієнт тепловіддачі в кристалізаторі, кДж/м<sup>2</sup>·°С,

$F_{\text{кр}}$  – площа поверхні стінок кристалізатора, м<sup>2</sup>,

$\Delta t_{\text{кр}}$  – перепад температур між розплавом і стінкою кристалізатора, °С.

Результати розрахунку швидкостей руху розплаву в різних точках кристалізатора по залежності (3) для різних умов експерименту наведені в табл. 1.

Для більш коректного визначення впливу вібрації на поле швидкостей в кристалізаторі виключали вимушене перемішування розплаву під впливом розливаючого струменя. Тобто охолодження на кристалізатор включали тільки після повного заспокоєння розплаву і в якості контрольних замірів фіксували швидкості руху розплаву, що викликаються природною конвекцією.

Таблиця 1

Розподіл швидкостей руху розплаву по осі вузьких граней кристалізатора у вертикальній площині

Відстань від поверхні розплаву, мм	Швидкість руху розплаву, м/с		
	Відстань від стінки кристалізатора, мм		
	12	26	52
50	+ 0,0015 / ± 0,10	0 / ± 0,08	- 0,008 / ± 0,07
130	+ 0,03 / ± 0,35	0 / ± 0,20	- 0,02 / ± 0,15
210	+ 0,06 / ± 0,70	0 / ± 0,50	- 0,04 / ± 0,3

Чисельник – без вібрації, знаменник – з вібрацією

У контрольному експерименті спостерігали просту гідродинамічну картину у вигляді циркуляційного руху розплаву, викликаного природною конвекцією. Значення швидкостей руху розплаву вздовж фронту кристалізації по висоті кристалізатора змінюються від 0 до 0,06 м/с (рис. 3). При цьому між спадаючою і висхідною частинами потоку існує «мертва» зона (з практично нульовою швидкістю руху розплаву). Наявність таких зон підтверджує математичне моделювання формування круглої заготовки [9]. Область розплаву, залученого в конвекційний рух, поширюється на глибину 1,5 – 2,0 см від фронту кристалізації і відповідає градієнтному перепаду температур по перетину заготовки.

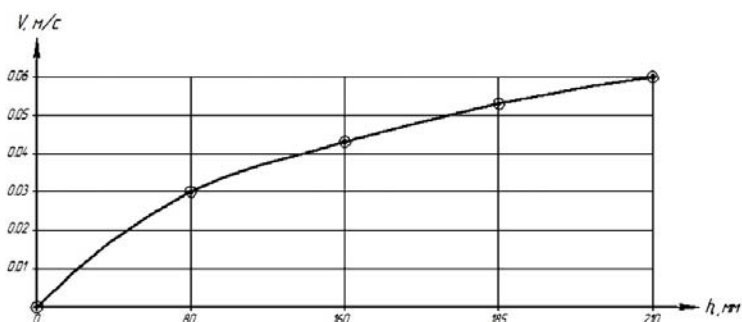


Рис. 3. Зміна швидкості руху розплаву вздовж фронту кристалізації по висоті кристалізатора для стаціонарних умов.

При вібраційній обробці заготовки залежно від параметрів і напрямку імпульсу, картина поля швидкостей змінюється. Вібрація руйнує прикордонний шар і, відповідно, циркуляційний рух розплаву. Спостерігається турбулентний рух практично по всьому об'єму розплаву з формуванням локальних вихорів різної протяжності [9]. По мірі остигання розплаву спостерігається укрупнення вихорів по всьому перетину заготовки. При цьому чисельні значення швидкостей руху розплаву у вихорах в 7 – 12 разів вище, ніж у контрольних експериментах (табл. 1).

Використовуючи залежності (4 – 8) проведено розрахунки відведеного з кристалізатора тепла, коефіцієнта тепловіддачі, маси затверділого сплаву залежно від умов експериментів (табл. 2, рис. 4). Видно, що максимальний темп зростання теплових параметрів формування заготовок спостерігається

## Плавлення і кристалізація

Таблиця 2

Вплив вібрації кристалізатора на параметри формування блюмінгової безперервнолитої заготовки

Параметри	Конт- рольний зразок	Параметри вібрації							
		Амплітуда $A = 0,2$ мм				Амплітуда $A = 0,5$ мм			
		Частота $\nu$ , Гц				Частота $\nu$ , Гц			
		19	31	47	61	19	31	47	61
Тепло, відведене в кристалізаторі, кДж	3681	4190	4402	4547	4630	4390	4710	4820	5000
Коефіцієнт тепловіддачі, кДж/м <sup>2</sup> ·°С	4601	7501	8695	9998	10380	9785	11520	13032	13660
Товщина кірки на виході з кристалізатора, мм	13	12	11	10	10	11	10	9	9
Середня швидкість кристалізації, мм/хв	1,6	1,8	2,0	2,1	2,2	2,0	2,2	2,5	2,8
Маса затверділого сплаву, кг	0,22	0,27	0,42	0,54	0,79	0,47	0,79	1,08	1,35
Глибина рідкої лунки, м	1,2	1,0	0,85	0,75	0,6	0,8	0,6	0,45	0,35

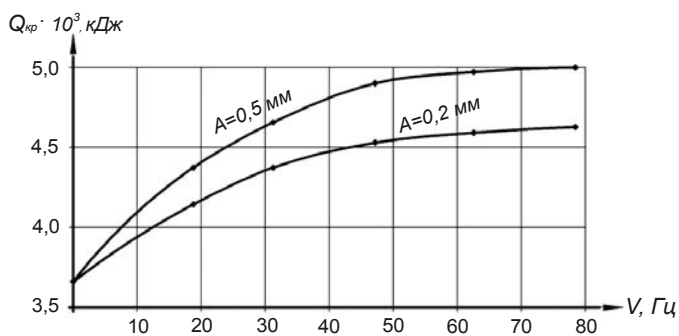


Рис. 4. Вплив вібрації на кількість теплоту, що відводиться від кристалізатора.

при збільшенні частоти вібрації від 0 до 47 Гц незалежно від амплітуди. У цих межах коефіцієнти тепловіддачі від розплаву до стінок кристалізатора зростають до 2,3 разів при  $A = 0,2$  мм і до 3,0 разів при  $A = 0,5$  мм. Відповідно зростає і кількість тепла, що відводиться: на 26 % при  $A = 0,2$  мм і на 36 % при  $A = 0,5$  мм.

Розрахунки свідчать про те, що вібрація сприяє збільшенню інтенсивності тепловідведення в кристалізаторі при формуванні заготовки. Вібрація призводить до інтенсифікації гідродинамічних процесів в кристалізаторі (табл. 1). Залежно від параметрів вібрації відбувається 1,3 – 1,5 кратне збільшення щільності теплових потоків, що свідчить про зниження термічного опору на ділянці «поверхня заготовки – стінка кристалізатора» [10]. За інших рівних умов важливу роль у формуванні заготовки грає амплітуда віброімпульсу.

Інтенсифікація теплообмінних процесів в кристалізаторі під впливом вібрації призводить до зростання темпу виділення прихованої теплоти кристалізації і зміни двофазної зони тверднучої заготовки, що, в кінцевому підсумку, впливає на формування структури заготовки. На початковій стадії твердження заготовки під впливом вібрації спостерігається зменшення товщини кірки на виході з кристалізатора порівняно з контрольним експериментом (табл. 2). Надалі зростає об'ємна швидкість кристалізації, про що свідчить збільшення маси затверділого сплаву.

Порівняння впливу вібрації на формування структури контрольної і дослідної заготовок показує, що вони складаються з трьох характерних зон: коркової, зони стовпчастих кристалів і зони рівноосних кристалів. Різниця між структурами полягає в зміні ширини і дисперсності відповідних зон. У контрольній заготовці спостерігаємо нерівномірність зони транскристалізації, внаслідок чого в деяких місцях утворюються раковини, усадки і пори. При вібрації ширина зони стовпчастих кристалів за рахунок обламування гілок дендритів зменшується в 2,5 рази і відбувається вирівнювання фронту кристалізації за висотою, відповідно, розширюється зона рівноосних кристалів. Частина уламків дендритів стають додатковими центрами кристалізації в об'ємі твердіючого розплаву, інші осідають в донній частині заготовки, зменшуючи глибину рідкої лунки (табл. 2). При цьому за рахунок кавітаційного руйнування вільно зростаючих кристалів в розплаві дисперсність зони рівноосних кристалів дослідної заготовки значно підвищується. Це призводить до зменшення дендритної неоднорідності за перерізом. Про це свідчить однакова щільність металу по перетину заготовок, що формуються під впливом вібрації [11, 12].

Таким чином, застосування вібрації дозволяє отримувати заготовки з дрібнозернистою рівномірно розподіленою по всьому перетину структурою. Інтенсифікація тепломасообмінних процесів зумовлює перспективність промислового використання цього методу впливу на сплав, що кристалізується. У реальній МБЛЗ віброімпульс може бути підведений як до кристалізатора, так і безпосередньо до самої заготовки в зоні вторинного охолодження. Максимальний ефект від вібраційного впливу може бути отриманий при підводі віброімпульса до самої заготовки при можливості регулювання її параметрів



впливу в широких межах. При підводі ж віброімпульса до кристалізатора з метою виключення розриву поверхневого шару шлаку і його затягування всередину заготовки необхідно обмежувати ці параметри, щоб не порушувати ламінарний характер руху розплаву.

### Література

1. Ефимов В.А. Разливка и кристаллизация стали. – М.: Металлургия, 1976. – 552 с.
2. Ефимов В.А., Эльдарханов А.С. Технологии современной металлургии. – М.: Новые технологии, 2004. – 784 с.
3. Скворцов А.А., Акименко А.Д., Ульянов В.А. Влияние внешних воздействий на процесс формирования слитков и заготовок. – М.: Металлургия, 1991. – 217 с.
4. Борисов Б.Т. Теория двухфазной зоны металлического слитка. – М.: Металлургия, 1987. – 222 с.
5. Дубоделов В.И., Фиксен В.Н., Слажнев Н.А. Разработка электромагнитного перемешивателя пульсирующего магнитного поля для плавки алюминиевых сплавов в отражательных печах большой вместимости // Вісник Донбаської держаної машинобудівної академії. – 2010. – № 3. – С. 6 – 69.
6. Гориславец Ю.М., Глухонький А.И. Определение скорости вращательного движения жидкого металла в устройстве непрерывного рафинирования // Техническая электродинамика. – 2008. – № 6. – С. 60 – 64.
7. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1975. – 560 с.
8. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики. – Киев: Наук. думка, 1989. – 863 с.
9. Тарасевич Н.И., Нурадинов А.С., Таранов Е.Д. Влияние вибрационной обработки на параметры затвердевания стальной заготовки // Процессы литья. – 2006. – № 1. – С. 64 – 69.
10. Нурадинов А.С., Эльдарханов А.С., Таранов Е.Д. Теплообменные процессы при формировании непрерывнолитых заготовок в поле упругих колебаний // Сталь. – 2006. – № 6. – С. 51 – 52.
11. Таранов Е.Д., Нурадинов А.С., Кондратюк С.Е. Кристаллизация и структурообразование стальных слитков в условиях вибрационного воздействия // Процессы литья. – 1998. – № 3 – 4. – С. 84 – 90.
12. Ефимов В.А., Нурадинов А.С., Эльдарханов А.С. Влияние вибрационной обработки на структуру и свойства слитка стали 60 // Сталь. – 2002. – № 12. – С. 15 – 17.

Одержано 01.08.13

**А. С. Нурадинов, А. С. Эльдарханов, А. В. Ноговицын, Е. Д. Таранов**

### **Влияние вибрации на формирование блюминговой непрерывнолитой заготовки**

#### **Резюме**

На модельном материале (камфен с трицикленом) исследовано влияние вибрации на формирование блюминговой непрерывнолитой заготовки. Установлено, что под воздействием вибрации происходит интенсификация гидродинамических и теплообменных процессов как в кристаллизаторе, так и в зоне вторичного охлаждения. Показана взаимосвязь указанных процессов с формированием первичной структуры заготовок.

A. S. Nuradynov, A. S. Eldarkhanov, O. V. Nogovitsyn, Ye. D. Taranov

The influence of vibration on the formation of bloom  
continuous casting

Summary

By using model alloy (camphene with tritsiklenom) is studied the effect of vibration on the formation of bloom continuous casting. It is found that the effect of vibration intensify heat transfer processes and hydrodynamic in the crystallizer and in the secondary cooling zone. The relationship of these processes with the formation of the primary structure of the ingots is shown.

УДК 621.74:669.715:551.482.32:539.216:620.186

*Одержання недендритної структури в  
алюмінієвому сплаві АК7*

А. М. Недужий

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

*Показано можливість одержання недендритної структури сплаву АК7 при заповненні ним ливарної форми із застосуванням тонкого металевого жолоба. Розраховані значення критерію Рейнольдса для сплаву на вході та виході з жолоба. Встановлено, що на вході жолоба має місце переважно турбулентний режим потоку сплаву, а на виході – ламінарний. Визначено оптимальні технологічні параметри процесу кристалізації та формування недендритної структури.*

На сьогоднішній день в ливарному виробництві існують методи порційного одержання частково закристалізованих алюмінієвих сплавів з недендритною структурою первинної фази. В одному випадку порція заданої маси сплаву з недендритною структурою після приготування відразу використовується для виготовлення вилівка заданої конфігурації [1], а в іншому – для одержання заготовки [2] для подальшого її використання, наприклад в технологіях тиксолиття. Одним з методів одержання заготовок із алюмінієвих сплавів з недендритною структурою первинної фази є заповнення порожнини металеві форми із застосуванням жолоба [3, 4]. Це доволі простий метод, який не потребує складного технологічного устаткування та додаткових витрат електроенергії. Він досить широко використовується, але при цьому в літературі немає конкретних оптимальних значень технологічних параметрів

---

Науковий керівник роботи, доктор технічних наук, професор, член-кореспондент НАНУ Борисов Г.П.