

Структурутворення і властивості литих заготовок під впливом вібрації при кристалізації розплаву

Нурадинов А. С., доктор технічних наук, провідний науковий співробітник,
nla_73@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7286-8648>

Чистяков О. В., аспірант, chistyakov1971@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7119-3562>

Нурадінов І. А., доктор філософії, науковий співробітник, inuradinov@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8916-5247>

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

Авторами роботи на прозорому органічному сплаві камфену та алюмінієвому сплаві АД31 досліджено формування структури та властивостей литих заготовок залежно від умов їхньої кристалізації, у тому числі під зовнішніми фізичними впливами. Показано, що формування структур всіх заготовок відбувається за однаковими схемами, незалежно від типу сплаву та умов кристалізації. Встановлено, що в контрольних заготовках (тобто без зовнішнього впливу) кристалізація відбувається, в основному, за схемою послідовного тверднення, про що однозначно свідчать їх макроструктури, які складаються лише з зон стовпчастих кристалів. При формуванні дослідних заготовок (тобто під вібраційним впливом) відбувається суттєва зміна умов їхньої кристалізації, що призводить до змішаної схеми їх тверднення. Візуальним спостереженням за формуванням дослідних заготовок зі сплаву камфена та з аналізу макроструктур заготовок з алюмінієвого сплаву АД31 встановлено, що в початковий момент у таких заготовках йде зародження та зростання тільки стовпчастих кристалів, тобто відбувається послідовне їх тверднення. З досягненням стовпчастими кристалами певних розмірів (довжин) відбувається їх часткове руйнування під впливом згинальних тисків пружних хвиль, а уламки кристалів за рахунок вібраційного перемішування рівномірно розподіляються по перерізу розплаву, що твердне. При цьому за рахунок появи переохолоджених мікрооб'ємів розплаву навколо кожного уламка кристала відбувається прискорене охолодження рідкої серцевини заготовок, що залишилася, забезпечуючи в подальшому об'ємне їх тверднення. В результаті таких ефектів вібраційного впливу на формування заготовок відбувається зниження їх структурної неоднорідності та суттєве підвищення дисперсності литого зерна. Закономірним наслідком таких змін у структурах дослідних заготовок є підвищення фізико-механічних властивостей литого металу з одночасним зниженням їхньої анізотропії по зонах.

Ключові слова: металеві та модельні сплави, заготовка, кристалізація, вібраційна обробка, структура, властивості.

Зливки та безперервнолиті заготовки є основною проміжною формою литого металу під час виробництва широкого спектра продукції та виробів із металевих сплавів. Внутрішня будова литих металевих заготовок, сформована в процесі їх тверднення, має ключовий вплив на подальші фізико-механічні властивості кінцевих виробів. Процес кристалізації рідкого металу у ливарних формах (у виливницях і кристалізаторах МБЛЗ) супроводжується вкрай складною взаємодією різних фізико-хімічних явищ, що визначають кінцеву якість литих заготовок (структурна та хімічна неоднорідності, утворення дефектів тощо) [1-5].

Для підвищення якості литих заготовок застосовують різні способи зовнішнього впливу на рідкий метал і метал, що кристалізується, до яких, зокрема, належить низькочастотна вібрація (з частотою $\nu \leq 200$ Гц і амплітудою $A \leq 2$ мм). Існує достатня кількість робіт, що підтверджують позитивний вплив вібрації на підвищення дисперсності кристалічної структури, зниження зональної та дендритної неоднорідності, підвищення механічних властивостей металів та їх сплавів [6-12]. Водночас є й роботи, у яких ставиться під сумнів доцільність використання віброімпульсних технологій у металургії [13, 14]. Така суперечливість результатів, отриманих різними авторами, зумовлена, на наш погляд, тим, що у своїх дослідженнях вони застосовували різні типи вібрації, неоднаковий хімічний склад і масу оброблюваного матеріалу, а також по-різному трактували суть процесів, що відбуваються в металі під час його тверднення.

У зв'язку з цим у даній роботі було проведено дослідження впливу вібрації на процеси кристалізації та структуроутворення литих заготовок із модельних і металевих сплавів.

Об'єктом досліджень були прямокутні заготовки перерізом 50×125 мм з модельного сплаву та круглі металеві заготовки діаметром 60 мм. Як матеріали для досліджень використовували модельний сплав камфену з трицикленом та алюмінієвий сплав АДЗ1 [2, 3, 6]. Прямокутні заготовки отримували зі сплаву камфену з трицикленом за допомогою експериментальної установки для фізичного моделювання (рис. 1), а круглі заготовки зі сплаву АДЗ1 відливали на лабораторній установці напівбезперервного лиття металів (рис. 2). Для кожного досліджуваного сплаву отримували по три контрольні (тобто без вібрації) та по три дослідні (під дією вібрації) заготовки.

Для дослідження процесів формування прямокутних блюмових заготовок було використано метод локального фізичного моделювання, коли умови подібності дотримуються на певній ділянці досліджуваного об'єкта [6]. Для цього була змонтована експериментальна установка (рис. 1 а), основним вузлом якої була термостатована фізична модель прямокутної форми (рис. 1, б), у якій і отримували блюмову заготовку зі сплаву камфену. Фізична модель дозволяла повністю охоплювати, для вивчення, зону кристалізатора та частину зони вторинного охолодження, що дорівнює чотирьом висотам кристалізатора.

На початку сплав камфену, виплавлений за допомогою термостата, заливали у фізичну модель, що складалася з п'яти однакових

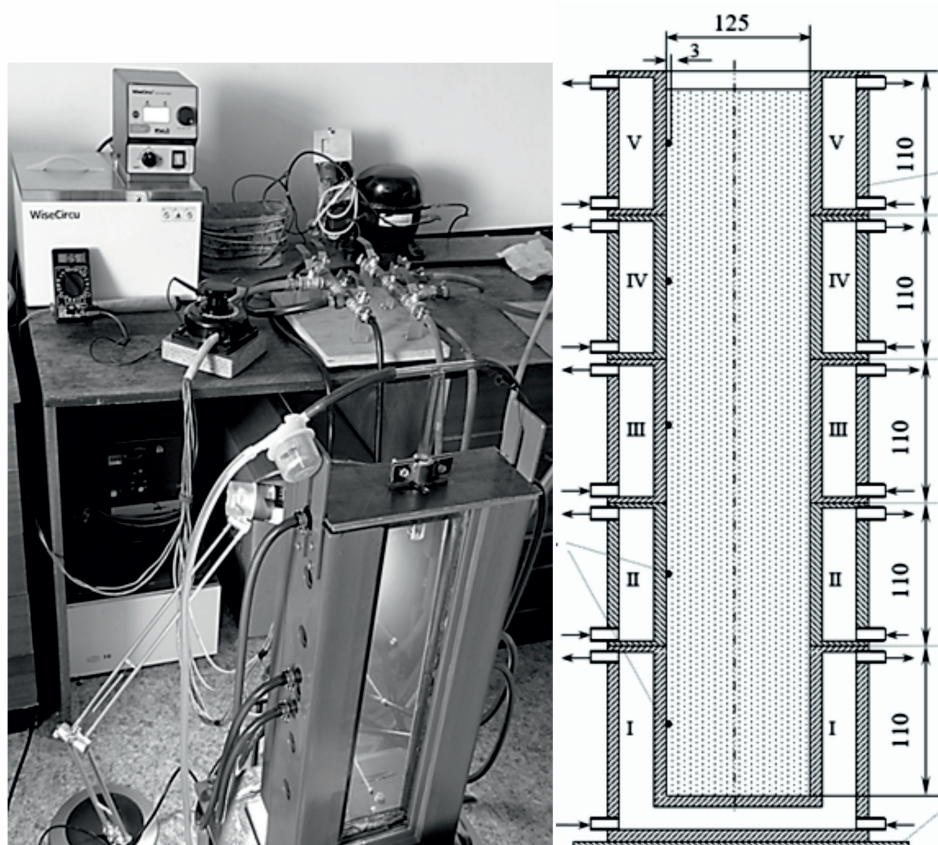


Рис. 1. Експериментальна установка (а) та схема моделі (б) для фізичного моделювання процесів формування прямокутної блюмової заготовки.

Fig. 1. Experimental setup (a) and model scheme (b) for physical modeling of the processes of forming a rectangular bloom billet.

водоохолоджуваних ділянок (I, II, III, IV, V). Кожна ділянка моделі, якщо розглядати їх окремо, відповідала розмірам кристалізатора за шириною, товщиною та висотою. Витягування модельної заготовки імітували послідовним заповненням кожної ділянки охолоджувальною водою, починаючи з I і до V. Після переключення охолодження на наступну ділянку кожна попередня ділянка відключалася від циркуляції. Пружні коливання (частотою 60 Гц і амплітудою 1 мм) передавалися до заготовки по напрямку її поздовжньої осі від вібратора, який жорстко кріпився до корпусу моделі. Враховуючи прозорість двох граней моделі та модельного середовища, процеси формування заготовок вдавалося візуально спостерігати та фіксувати у прохідному світлі від денної лампи (рис. 1 а).

Круглі заготовки з алюмінієвого сплаву АД31 відливали на лабораторній установці напівбезперервного лиття металевих сплавів (рис. 2). Необхідний об'єм досліджуваного алюмінієвого сплаву виплавляли у електропечі опору САТ-0,25. Рідкий метал через заливну воронку (1) подавали у кристалізатор (2). По мірі наповнення кристалізатора рідким

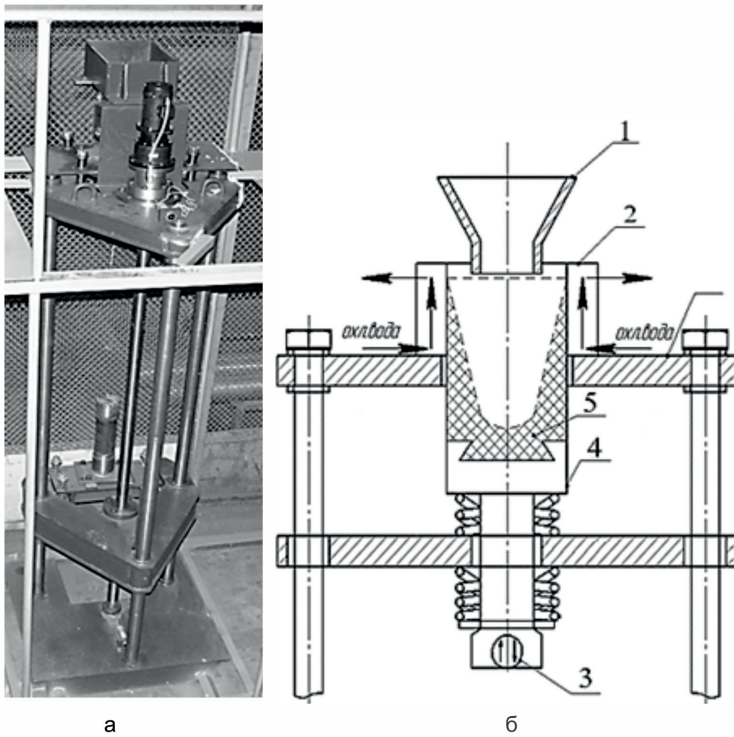


Рис. 2. Фото (а) та схема (б) лабораторної установки для напівбезперервного лиття металевих сплавів.

Fig. 2. Photo (a) and diagram (b) of a laboratory installation for semi-continuous casting of metal alloys.

металом включали механізм для витягування заготовки, що відливається, та вібрацію. Вібратор ексцентрикового типу (3) був жорстко закріплений до хвостовика (4), від якого вібропульсації (частотою 90 Гц і амплітудою 1,5 мм) передавалися безпосередньо до заготовки (5) уздовж її осьової вертикальної площини (рис. 2 б).

Для проведення металографічних досліджень та визначення механічних характеристик сплаву АД31 у литому вигляді з ідентичних зон заготовок вирізали відповідні зразки однакових розмірів. Порівняльному аналізу піддавалися структури заготовок (контрольних та дослідних) уздовж їх осьової вертикальної площини. Проявлення макро- та мікроструктур досліджуваного алюмінієвого сплаву АД31 здійснювали стандартними реактивами, а механічні властивості визначали відповідними випробуваннями за ГОСТ 1497-84 та ГОСТ 9454-78. Для візуалізації макроструктур заготовок зі сплаву камфену, з огляду на його особливості, достатньо було пропустити світло від лампи через скляні (прозорі) грані моделі.

Перед тим як приступити до аналізу результатів досліджень, коротко розглянемо теоретичні основи механізму впливу вібрації на процеси кристалізації та структуроутворення сплавів. Отже, при впливі вібрації на розплав відбувається миттєва зміна масових сил у об'ємі металу, що твердне. Це зумовлено тим, що вібраційна обробка, по суті, є введенням у розплав металу, що твердне, додаткової енергії пружних хвиль ($dF_{\text{вібр.}}$), яку можна визначити за наступною залежністю [7]:

$$dF_{\text{вібр.}} \approx \rho \cdot \omega^2 \cdot A^2 \cdot dV, \quad (1)$$

де ρ – густина рідкого металу; dV – локальний об'єм розплаву металу; ω , A – частота та амплітуда вібрації (пружних хвиль).

Внаслідок введення додаткової енергії пружних хвиль у обмежений об'єм металевого розплаву, що твердне, на межі фаз виникають градієнти тисків, які здійснюють циклічний згинальний вплив на зростаючі кристали (гілки дендритів). Величина цього тиску (P), як відомо, прямо пропорційна амплітуді (A) та частоті (ω) пружної хвилі і визначається за залежністю [8]:

$$P = \pm \rho \cdot A \cdot \omega^2 \cdot H, \quad (2)$$

де H – відстань від відкритої поверхні розплаву до розглядуваної точки.

Очевидно, що під впливом циклічних тисків пружних хвиль у зростаючих кристалах (дендритах) виникають напруження (σ_u). При певних значеннях параметрів вібрації ці напруження досягають критичних величин, при яких відбувається часткове руйнування гілок дендритів, тобто при дотриманні наступної умови:

$$\sigma_u \geq \sigma_a, \quad (3)$$

де σ_a – межа міцності гілок дендрита при температурі кристалізації.

З цього елементарного теоретичного аналізу видно, що основний ефект впливу вібрації на формування кристалічних структур литих заготовок полягає у руйнуванні зростаючих кристалів (або гілок дендритів). При цьому виділення переохолоджених мікрооб'ємів розплаву (Δt) навколо кожного плаваючого уламка дендрита є додатковим (побічним) ефектом від впливу вібрації, який має сприяти появі додаткових центрів кристалізації в об'ємі металу, що твердне, за рахунок його більш швидкого охолодження [7]:

$$\Delta t = (\sigma_{m-p} \cdot t_e) / r \cdot \rho \cdot q_{\text{кр}}, \quad (4)$$

де σ_{m-p} – міжфазне натягнення; t_e – рівноважна температура кристалізації сплаву; r – розмір плаваючого кристала; ρ і $q_{\text{кр}}$ – густина розплаву та питома теплота кристалізації.

Отримані результати досліджень підтвердили позитивний вплив вібрації на якісні характеристики литих заготовок (структуру та властивості) із досліджуваних сплавів. Насамперед слід відзначити вищу якість поверхні заготовок, відлитих під дією вібрації (рис. 3). Наприклад, на поверхні контрольної заготовки з алюмінієвого сплаву АД31 чітко спостерігаються такі дефекти, як незлітини, надири та оксидні плівки (рис. 3а), тоді як на поверхні дослідної заготовки (тобто під дією вібрації) подібні

дефекти практично відсутні (рис. 3 б). При цьому, як показали подальші металографічні дослідження, підповерхневі дефекти практично повністю усуваються.

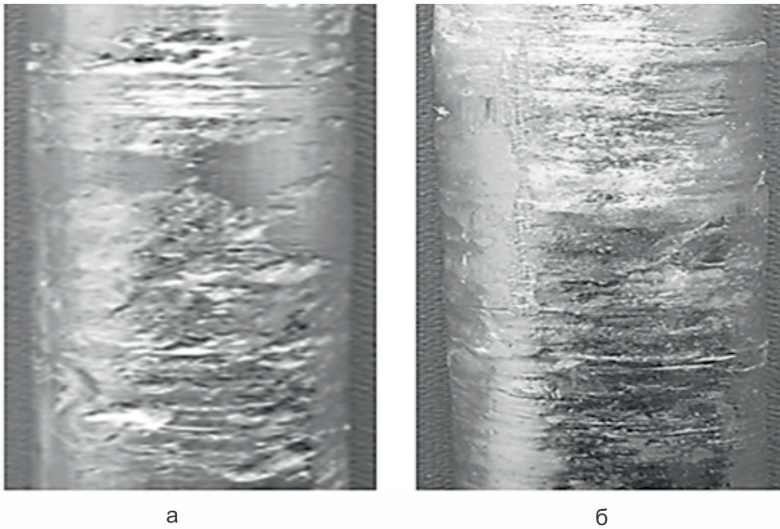


Рис. 3. Якість поверхонь контрольної (а) та дослідної (б) заготовок з алюмінієвого сплаву АД31.

Fig. 3. Surface quality of control (a) and experimental (b) blanks made of aluminum alloy AD31.

Одним із найважливіших критеріїв оцінки якості литих заготовок є характеристики їх первинних кристалічних структур (форма та дисперсність литого зерна, розміри структурних зон тощо), від яких залежать рівень фізико-механічних властивостей кінцевої металопродукції та виробів. Порівняльний макроструктурний аналіз отриманих заготовок для обох досліджуваних сплавів показує, що вібрація чинить суттєвий вплив на їх формування (рис. 4 і 5). З наведених рисунків видно, що макроструктури всіх заготовок складаються зі «стандартних» зон: коркової зони, зони транскристалізації та зони рівноосних кристалів. Різниця між структурами контрольної та дослідної заготовок полягає у зміні ширини відповідних зон і дисперсності кристалів у них.

У структурах контрольних заготовок у деяких місцях спостерігаються перемички («містки»), імовірно, утворені через нерівномірність товщини зон транскристалізації за їх висотою (рис. 4 і 5 а). «Стандартним» наслідком утворення «містків» є поява у заготовках внутрішніх дефектів усадкового характеру (осьових тріщин, усадкових раковин, пор тощо) через те, що їх тверднення нижче перемичок відбувається за умов недостатнього підживлення рідким металом. У дослідних заготовках циклічні згинальні тиски пружних хвиль руйнують дендрити в зоні стовпчастих кристалів і, таким чином, усувають імовірність утворення «містків» за їх висотою, що є головною умовою зниження (або усунення) внутрішніх дефектів такого характеру (рис. 4 і 5 б).

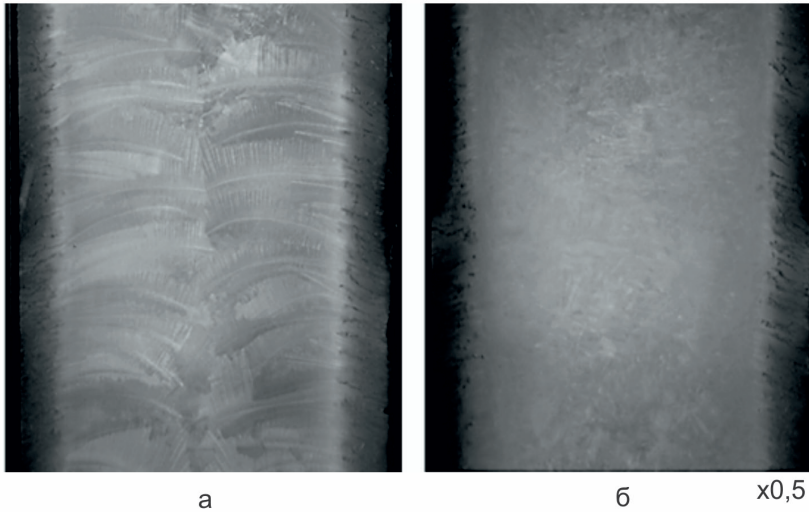


Рис. 4. Макроструктури контрольної (а) та дослідної (б) заготовок із сплаву камфену в поздовжній осевій площині.

Fig. 4. Macrostructures of control (a) and experimental (б) blanks made of camphene alloy in the longitudinal axial plane.

Структура литого металу залежить від умов його кристалізації, і, як відомо, можливі три схеми тверднення литих заготовок, а саме: послідовна, об'ємна та змішана [15]:

$$\Delta t_{кр.} / \Delta t_{сл.} \ll 1 - \text{послідовне тверднення}; \quad (5)$$

$$\Delta t_{кр.} / \Delta t_{сл.} \gg 1 - \text{об'ємне тверднення}; \quad (6)$$

$$\Delta t_{кр.} / \Delta t_{сл.} \approx 1 - \text{змішане тверднення}, \quad (7)$$

де $\Delta t_{кр.}$ – величина переохолодження; $\Delta t_{сл.}$ – перепад температури по перерізу заготовки.

Так, з аналізу структур контрольних заготовок можна припустити, що їх кристалізація, ймовірно, протягом усього процесу відбувається за схемою послідовного тверднення, про що свідчить незначна ширина зон рівноосних кристалів у них (рис. 4 і 5 а; табл. 1). А кристалічна будова дослідних заготовок вказує на те, що під впливом вібрації їх тверднення відбувається за змішаною схемою. На початковому етапі в дослідних заготовках, очевидно, відбувається зародження та зростання лише стовпчастих кристалів, тобто відбувається послідовне їх тверднення. При досягненні стовпчастими кристалами певних розмірів (довжин) під дією згинальних тисків пружних хвиль відбувається їх часткове руйнування, а уламки завдяки вібраційному перемішуванню рівномірно розподіляються по перерізу металу, що твердне, забезпечуючи в подальшому об'ємне тверднення заготовок. При цьому виділення переохолоджених мікрооб'ємів розплаву (Δt) навколо кожного плаваючого уламка дендрита є додатковим ефектом від впливу вібрації, який сприяє появі додаткових центрів кристалізації в об'ємі металу, що

Таблиця 1

Розміри структурних зон у литих заготовках із досліджуваних сплавів

Table 1

Dimensions of structural zones in cast billets from the studied alloys

Сплав	Умови формування	Зона стовпчатих кристалів, мм	Зона рівноосних кристалів, мм
Камфен	вільне	49÷52	3÷6
	з вібрацією	10÷12	86÷90
Алюмінієвий сплав АД31	вільне	25÷26	4÷5
	з вібрацією	8÷10	40÷42

твердне, за рахунок його більш швидкого охолодження. Про все це свідчить суттєве скорочення зон транскристалізації в дослідних заготовках та значне збільшення дисперсності і ширини зон рівноосних кристалів у них (рис. 4 і 5 б; табл. 1).

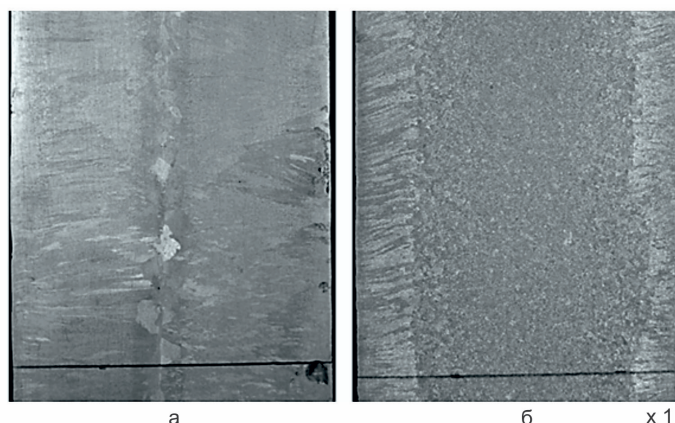


Рис. 5. Макроструктури контрольної (а) та дослідної (б) заготовок з алюмінієвого сплаву АД31 в осьовій площині.

Fig. 5. Macrostructures of control (a) and experimental (b) blanks made of aluminum alloy AD31 in the axial plane.

Вплив вібрації на формування мікроструктур литих заготовок із обох досліджуваних сплавів здебільшого проявляється лише в їх центральних зонах [6]. Наприклад, у контрольних заготовках із модельного сплаву камфену в центральній зоні формується мікроструктура з несприятливою блочною будовою з чіткими межами поділу між ними (рис. 6 а). У дослідних заготовках під впливом вібрації та сама зона являє собою однорідну (безблочну) мікроструктуру високої дисперсності (рис. 6 б).

Мікроструктури контрольних та дослідних заготовок із алюмінієвого сплаву АД31 у поверхневих зонах (аналогічно сплаву камфену) практично не відрізняються одна від одної і представляють собою кристали α -твердого розчину алюмінію та евтектику, яка кристалізується в міждендритних просторах. У центральних зонах контрольних заготовок характер

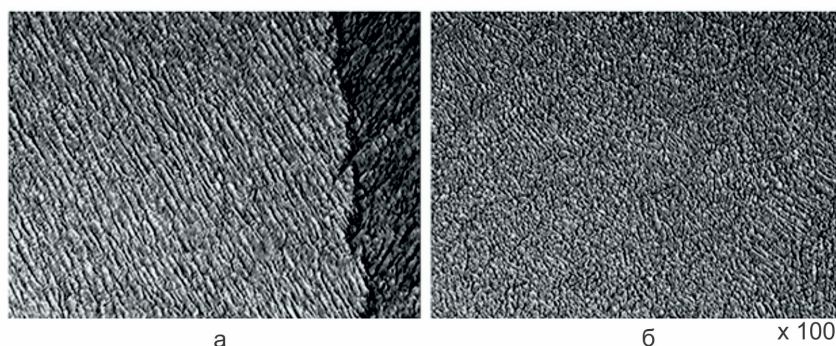


Рис. 6. Мікроструктури центральних зон контрольної (а) та дослідної (б) заготовок із модельного сплаву камфену.

Fig. 6. Microstructures of the central zones of the control (a) and experimental (б) blanks made of a model camphene alloy.

кристалізації призводить до збільшення в її центральній частині кількості подвійної евтектики, а також кількості неметалічних включень і дрібних пор (рис. 7 а). У заготовках, що затверділи під впливом вібрації, спостерігається більш рівномірний розподіл евтектичної складової та неметалічних включень, які у найзабрудненіших місцях не перевищують 1 бал за ГОСТ 1778-70 (рис. 7 б).

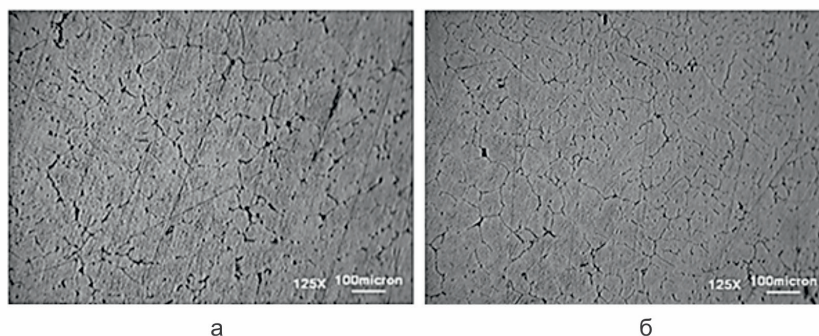


Рис. 7. Мікроструктури осьових зон контрольної (а) та дослідної (б) заготовок із алюмінієвого сплаву АД31.

Fig. 7. Microstructures of axial zones of control (a) and experimental (б) blanks made of aluminum alloy AD31.

Результати стандартних випробувань зразків із алюмінієвого сплаву АД31 за ГОСТ 1497 та ГОСТ 9454 показали, що фізико-механічні характеристики литого металу в заготовках корелюють із параметрами їхніх кристалічних структур. Зміни в структурах заготовок, зумовлені впливом вібрації, призвели до помітного підвищення фізико-механічних характеристик металу з одночасним зниженням їхньої анізотропії по зонах (табл. 2).

Проведені дослідження показали, що якісні характеристики литих заготовок суттєво залежать від умов її кристалізації, якими можна керувати за допомогою зовнішніх фізичних впливів. Встановлено, що вібраційна обробка

Таблиця 2

Фізико-механічні характеристики литого металу в заготовках

Table 2

Physical and mechanical characteristics of cast metal in blanks

Структурна зона заготовки	ρ , кг/м ³	σ_v , МПа	σ_t , МПа	δ , %	Ψ , %
Стовпчастих кристалів	2560	83	72	32	37
	2550	67	55	25	32
Рівноосних кристалів	2570	87	76	34	39
	2515	48	42	22	24

розплавів, що твердіють, зменшує товщину зон стовпчастих кристалів у заготовках у 2-3 рази та збільшує ширину зони рівноосних кристалів в них у 5-8 разів. При цьому дисперсність зерна в зоні рівноосних кристалів для обох сплавів підвищується у 5-15 разів. Логічним наслідком таких змін у кристалічній будові заготовок зі сплаву АД31 є суттєве підвищення фізико-механічних характеристик литого металу при одночасному зниженні їхньої анізотропії по перерізу заготовок. Отже, під впливом вібрації густина литого металу зростає і практично вирівнюється по периферійних та центральних зонах заготовок (2,56 та 2,57 г/см, відповідно). Позитивний вплив вібрації спостерігається й на механічні властивості металу в заготовках: показники міцності підвищуються на 54-62 %, а пластичності – на 25-35 %.

Література

1. Данилов В. И. Строение и кристаллизация жидкостей. – К.: Изд-во АН УССР, 1956. – 566 с.
2. Салли И. В. Кристаллизация сплавов. – К.: Наукова думка, 1974. – 238с.
3. Овсиенко Д. Е. Зарождение и рост кристаллов из расплава. – К.: Наукова думка, 1994. – 256 с.
4. Флемингс М. Процессы затвердевания. – М.: Мир, 1977. – 423 с.
5. Ефимов В. А. Рост кристаллов и термокапиллярный массоперенос при затвердевании сплавов // Процессы литья. – 2001. – № 1. – С. 5-14.
6. Таранов Е. Д., Нурадинов А. С., Эльдарханов А. С., Дука В. М. Влияние вибрации на кристаллизацию, структуру и свойства полунепрерывнолитой заготовки // Процессы литья. – 2011. – № 5. – С. 44-49.
7. Нурадинов А. С., Ноговицын А. В., Нурадинов И. А., Зубенина Н. Ф. Внешнее термосиловое воздействие как фактор управления формированием структуры литых заготовок // Процессы литья. – 2019. – № 4. – С. 11-19.
8. Нурадинов А. С., Прыгунова А. Г., Шейгам В. Ю., Вернидуб А. Г., Нурадинов И. А. Физические методы управления формированием структуры металлов // Металл и литье Украины. – 2020. – № 2. – С. 64-71.
9. Eldarkhanov A., Figovsky O., Nuradinov A. Influence of vibration on continuously cast blooms // Scientific Israel – Technological Advantages. – 2014. – Vol. 16, № 1-2. – P. 225-228.

10. Нурадинов А. С., Наривский А. В., Нурадинов И. А. и др. Процессы формирования структуры в стальных слитках при теплосиловых воздействиях на затвердевающий металл // Процессы литья. – 2021. – № 4. – С. 22-30.
11. Шейгам В. Ю., Прыгунова А. Г., Кошелев М. В., Нурадинов А. С. и др. Управление структурой отливки через открытую поверхность прибыли // Процессы литья. – 2021. – № 4. – С. 30-40.
12. Nuradinov A. S., Nogovitsyn A. V., Nuradinov I. A. et al. Research of possibility of control of the formation of crystal structure of metal alloys // Science and Innovation. – 2020. – Vol. 16, № 4. – P. 67-73.
13. Campbell I. Effects of vibration during solidification // International Metals Reviews. – 1981. – № 2. – P. 71-103.
14. Ефимов В. А. Перспективы развития работ по применению внешних воздействий на жидкий и кристаллизующий расплав // Влияние внешних воздействий на жидкий и кристаллизующий металл : сб. науч. тр. – К. : Наукова думка, 1983. – С. 3-22.
15. Вейник А. Й. Теория затвердевания отливки. – М. : Машгиз, 1960. – 435 с.

References

1. Danilov, V. I. (1956). *Structure and crystallization of liquids*. Kyiv: Publishing House of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR. [in Russian].
2. Sally, I. V. (1974). *Crystallization of alloys*. Kyiv: Naukova Dumka. [in Russian].
3. Ovsienko, D. E. (1994). *Nucleation and growth of crystals from the melt*. Kyiv: Naukova Dumka. [in Russian].
4. Flemings, M. (1977). *Solidification processes*. Moscow: Mir. [in Russian].
5. Efimov, V. A. (2001). Crystal growth and thermocapillary mass transfer during alloy solidification. *Casting Processes*, 1, 5-14. [in Russian].
6. Taranov, E. D., Nuradinov, A. S., Eldarkhanov, A. S., & Duka, V. M. (2011). Influence of vibration on crystallization, structure, and properties of semi-continuously cast billets. *Casting Processes*, 5, 44-49. [in Russian].
7. Nuradinov, A. S., Nogovitsyn, A. V., Nuradinov, I. A., & Zubenina, N. F. (2019). External thermo-force impact as a factor controlling the structure formation of cast billets. *Casting Processes*, 4, 11-19. [in Russian].
8. Nuradinov, A. S., Prygunova, A. H., Sheigam, V. Yu., Vernidub, A. H., & Nuradinov, I. A. (2020). Physical methods for controlling the structure formation of metals. *Metal and Casting of Ukraine*, 2, 64-71. [in Russian].
9. Eldarkhanov, A., Figovsky, O., & Nuradinov, A. (2014). Influence of vibration on continuously cast blooms. *Scientific Israel – Technological Advantages*, 16 (1-2), 225-228.
10. Nuradinov, A. S., Narivskiy, A. V., Nuradinov, I. A., et al. (2021). Processes of structure formation in steel ingots under thermo-force effects on solidifying metal. *Casting Processes*, 4, 22-30. [in Russian].
11. Sheigam, V. Yu., Prygunova, A. H., Koshelev, M. V., & Nuradinov, A. S., et al. (2021). Control of casting structure through the open surface of the riser. *Casting Processes*, 4, 30-40. [in Russian].
12. Nuradinov, A. S., Nogovitsyn, A. V., Nuradinov, I. A., et al. (2020). Research on the possibility of controlling the formation of the crystal structure of metal alloys. *Science and Innovation*, 16 (4), 67-73.
13. Campbell, I. (1981). Effects of vibration during solidification. *International Metals Reviews*, 2, 71-103.
14. Efimov, V. A. (1983). Prospects for the development of research on the application of external influences on liquid and crystallizing melts. In *Influence of external effects on liquid and crystallizing metal* (pp. 3-22). Kyiv: Naukova Dumka. [in Russian].

15. Veynik, A. I. (1960). *Theory of casting solidification*. Moscow: Mashgiz. [in Russian].

Одержано 08.11.25

Structure formation and properties of cast billets under the influence of vibration during melt crystallization

A. S. Nuradinov, Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher, nla_73@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7286-8648>

O. V. Chistyakov, Postgraduate Student, chistyakov1971@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7119-3562>

I. A. Nuradinov, PhD, Researcher, inuradinov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8916-5247>

Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Summary

The authors investigated the formation of the structure and properties of cast billets made from a transparent organic camphene-based alloy and an aluminum alloy AD31, depending on the conditions of their crystallization, including under external physical influences. It was shown that the structural formation of all billets occurs according to the same patterns, regardless of the alloy type and crystallization conditions. It was established that in the control billets (i.e., without external influence), crystallization mainly proceeds according to the scheme of sequential solidification, as clearly evidenced by their macrostructures, which consist only of columnar crystal zones. During the formation of experimental billets (i.e., under vibrational influence), significant changes in the crystallization conditions occur, leading to a mixed solidification scheme. Visual observations of the formation of experimental camphene alloy billets and macrostructure analysis of AD31 aluminum alloy billets showed that, at the initial stage, the nucleation and growth of only columnar crystals take place, meaning that solidification occurs sequentially. As the columnar crystals reach a certain size (length), they undergo partial destruction under the influence of bending stresses of elastic waves, and the crystal fragments, due to vibrational mixing, are evenly distributed throughout the cross-section of the solidifying melt. At the same time, the appearance of supercooled micro-volumes of the melt around each crystal fragment causes accelerated cooling of the remaining liquid core of the billet, thereby ensuring its subsequent volumetric solidification. As a result of such vibrational effects during billet formation, the structural heterogeneity decreases and the dispersion of the cast grain significantly increases. A natural consequence of these structural changes in the experimental billets is the improvement of the physicomachanical properties of the cast metal, accompanied by a decrease in their anisotropy across different zones.

Keywords: metallic and model alloys, billet, crystallization, vibration treatment, structure, properties.