

<https://doi.org/10.15407/plit2026.02.018>

УДК 669.017.3:621.74.047

А.С. Нурадинов, докт. техн. наук., пров. наук. співроб.;

e-mail: nla_73@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-7286-8648>;

О.В. Чистяков, аспірант; e-mail: chistyakov1971@gmail.com;

<https://orcid.org/0000-0002-7119-3562>;

І.А. Нурадинов, докт. філос., наук. співроб.;

e-mail: inuradinov@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-8916-5247>

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

ВПЛИВ ТЕРМОЧАСОВОЇ ОБРОБКИ ТА ПРУЖНИХ КОЛИВАНЬ НА КРИСТАЛІЗАЦІЮ МЕТАЛЕВИХ СПЛАВІВ

Роботу присвячено дослідженню процесів кристалізації та структуроутворення металевих сплавів, у тому числі в умовах зовнішніх термосилових впливів на них у рідкому стані та при твердненні. При проведенні цих досліджень як основний застосовано метод фізичного моделювання. Об'єктами для вивчення стали низькотемпературні ($t_{пл} \leq 100^\circ\text{C}$) металеві сплави Вуда і Розе та прозорі органічні середовища салол, камфен та дифеніламін. При проведенні експериментів застосовано різні методи фізичного моделювання (методи мікрооб'ємів, плоских та об'ємних зразків тощо) для оцінки впливу масштабних у дослідних зразках. У результаті проведених досліджень спростовано висловлені в літературі теорії поверхневої та об'ємної кристалізації щодо залежності переохолодження рідкого металу перед кристалізацією від його перегріву та механізму впливу пружних коливань на зародкоутворення у розплавах металів. Доведено, що вплив температури перегріву металів при плавленні на ступінь їх переохолодження перед кристалізацією зумовлений залежністю концентрації наявних у них обмежено розчинних домішок. Встановлено, що механізм впливу пружних коливань на зародкоутворення у розплавах металів полягає у підвищенні швидкості зародження кристалів через створення ступенів росту (дислокації) на поверхнях адсорбованих зародків при їх кавітаційній ерозії та механічному терті між собою та зі стінками ливарних форм. Визначено механізм впливу вібрації на формування кристалічних структур литих металевих заготовок, який полягає у появі додаткових ефектів у процесі їх кристалізації, а саме: руйнування частини стовпчастих кристалів на поверхнях тепловідведення та розподіл цих уламків по об'єму розплаву в результаті його перемішування; підвищення швидкості зародження кристалів у розплавах металів; забезпечення постійної інтенсивного тепловідведення від розплаву, що твердне, за рахунок зниження товщини теплового бар'єру на стінках ливарних форм в результаті руйнування стовпчастих кристалів на них.

Ключові слова: металеві сплави, органічні середовища, домішки, перегрів, переохолодження, зародження кристалів, кристалізація, пружні коливання.

Вступ

Головним завданням при отриманні литих заготовок із рідких металів є створення таких умов їх тверднення, за яких вони мали б дрібнокристалічні структури, незначну хімічну неоднорідність, мінімальну кількість внутрішніх дефектів тощо. Процесами кристалізації, формуванням структури та властивостей литих заготовок можна керувати шляхом впливу на утворення зародків в розплавах металів, що твердіють, та їх зростанням. Розуміння фізичної сутності процесів зародження та зростання кристалів у розплавах є основою для управління формуванням структури та властивостей литих заготовок з металів. Тому проблемі зародження та зростання кристалів присвячено достатню кількість теоретичних та експериментальних

досліджень [1–5]. Існує чимало робіт, що підтверджують можливість впливу на процеси кристалізації металів різними зовнішніми фізичними діями [4, 6–12]. Однак результати деяких досліджень суперечать один одному, що, на нашу думку, спричинено відсутністю системності в них та відмінністю використовуваних матеріалів і методик.

У зв'язку з цим було поставлено завдання встановити механізми (закономірності) зовнішнього термосилового впливу на зародження та зростання кристалів у металевих розплавах для управління формуванням структур та властивостей литих заготовок із них.

Матеріали та методики досліджень. При виробництві металургійних заготовок зазвичай відбувається кристалізація відносно великих об'ємів металів. Дослідження процесів кристалізації в таких об'єктах практично нереальне через вплив безлічі неконтрольованих факторів, а саме: висока температура і непрозорість розплавів металів, неможливість управління тепло- та масообміном, наявність флуктуацій температур, густин, концентрацій домішок тощо. Щоб розв'язати цю задачу, широко використовуються непрямі методи досліджень, зокрема фізичне моделювання, що й було зроблено у цій роботі. Для проведення досліджень розроблено оригінальні методики фізичного моделювання та створено відповідні експериментальні установки [13–17]. Об'єктом вивчення при моделюванні в цих дослідженнях стали низькотемпературні металеві сплави Вуда (12,5 % олова, 12,5 % кадмію, 25 % свинцю, 50 % вісмуту) і Розе (25 % олова, 25 % свинцю, 50 % вісмуту) та прозорі органічні середовища — дифеніламін ($C_{12}H_{11}N$), камфен ($C_{10}H_{16}$) та салол ($C_{13}H_{16}O_3$) [13–17]. Практичну перевірку результатів фізичного моделювання здійснено на реальних металах та сплавах: алюмінію технічної чистоти А5 та нержавіючої сталі 12Х18Н9Т [17].

Обговорення результатів досліджень. Для переходу металу з рідкого у твердий стан необхідно, щоб його розплав мав певне переохолодження відносно його температури кристалізації. Згідно з теорією кристалізації, тільки тоді енергетичний стан твердого металу стає вигіднішим, ніж у рідкого, тобто з'являється різниця вільних енергій між рідкою (G_p) і твердою (G_{TB}) фазами (G , рис. 1). Ця різниця енергій є рушійною силою процесу кристалізації і дорівнює [1]:

$$\Delta G = G_p - G_{TB} = L \cdot \frac{\Delta t^-}{t_{kp}}, \quad (1)$$

де L — тепло кристалізації металу; Δt^- — переохолодження розплаву металу; t_{kp} — рівноважна температура кристалізації металу.

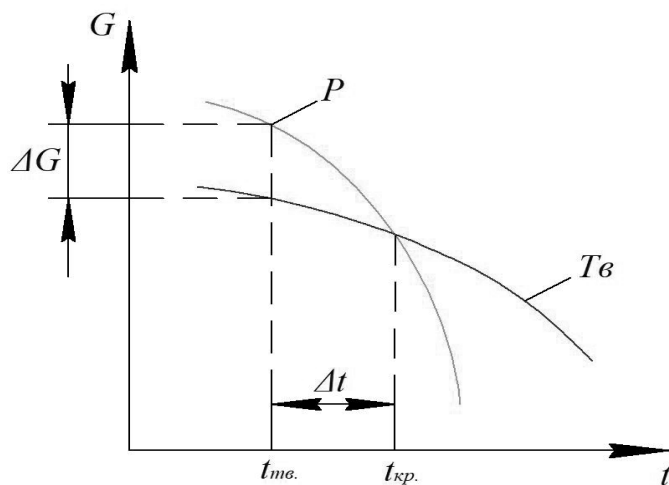


Рис. 1. Залежність вільної енергії (G) рідкого (P) та твердого (T_B) металу від температури (t)

Відомо, що з підвищенням температур перегріву рідких металів над температурою ліквідусу (Δt^*) відбувається збільшення їх переохолоджень перед кристалізацією (Δt) з поступовим виходом на плато. При цьому ступінь переохолодження розплаву, при якій відбувається зародження кристалів, залежить від природи металу, його чистоти, температур перегріву, охолодження тощо. Таким чином, можна вважати, що переохолодження розплавів металів є одним із головних параметрів процесу зародкоутворення у них, за зміною якого можна судити про ефекти домішок, зовнішніх впливів та інших факторів.

У результаті цих досліджень було встановлено, що для всіх використаних модельних матеріалів залежність переохолодження від температури перегріву має такий самий характер, що і для металів (рис. 2). У літературі висловлені теорії поверхневої та об'ємної кристалізації, що пояснюють залежність переохолодження розплаву перед кристалізацією від перегріву. Але вони не були експериментально підтверджені для деяких металів, наприклад алюмінію, для якого максимальні переохолодження досягаються при перегрівіх більше 200–400°C [18, 19].

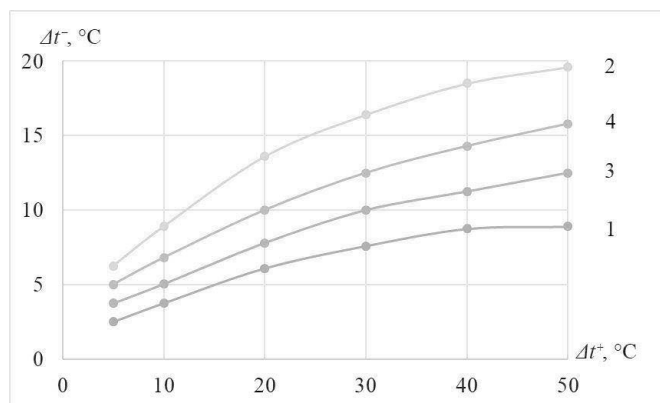


Рис. 2. Залежність переохолодження (Δt) зразків із досліджуваних модельних матеріалів об'ємом $12 \times 10^{-6} \text{ м}^3$ від температури перегріву (Δt^*) протягом 2 хв.: 1 — сплав Розе; 2 — сплав Вуда; 3 — камфен; 4 — дифеніламін

У першому випадку вважається, що кристалізація починається на поверхні між розплавом і твердими підкладками (стінками тиглів, оксидними плівками та іншими твердими частинками). Перегрів впливає на стан цієї поверхні. Наприклад, припускається збереження твердого металу в порах тигля (при багаторазовому переплавлення в тому самому тиглі) або в порах оксидної плівки при перегріві до деякої критичної температури. Твердий метал зберігається завдяки поверхневій енергії і підвищеному тиску, якого він зазнає в порі через більший коефіцієнт розширення металу, ніж оксиду. Друга теорія вказує на існування в розплавах металів мікрогрупувань атомів (кластерів), які зберігають далекий порядок у своєму розташуванні в просторі при невеликому перегріві розплаву над температурою ліквідус і слугують зародками при кристалізації, але руйнуються при відносно більших перегрівіх.

Результати цих досліджень демонструють, що вплив перегріву розплаву на його переохолодження, найімовірніше, зумовлений станом обмежено розчинних домішок у них, тобто зміною їх концентрації з ростом температури [13–17]. Розчинність таких домішок із підвищенням температури зростає, внаслідок чого змінюються фізико-хімічні властивості розплаву (рівноважна температура кристалізації, в'язкість, теплота фазового переходу тощо). Так, під час проведення дослідів із дифеніламіном та салолом був зафіксований факт, коли при температурах перегріву вище певного рівня ($> 100^\circ\text{C}$) їх розплави змінювали свій колір. Крім того, було встановлено, що температури їх плавлення (кристалізації) після перегріву, наприклад до 120°C , знижувалися на $2\text{--}4^\circ\text{C}$.

На користь нашої гіпотези свідчать такі результати. В одному з варіантів експериментів три однакові за об'ємом зразки зі сплаву Вуда ($V = 2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3$), нагріті до 90°C (перегрів $\Delta t^+ = 22^\circ\text{C}$), переохолоджувалися перед кристалізацією однаково до $\Delta t^- = 35 \pm 1^\circ\text{C}$. При об'єднанні цих трьох зразків в один зразок його переохолодження знижувалося до $\Delta t^- = 25 \pm 1^\circ\text{C}$. Зроблено припущення, що зменшення переохолодження пов'язане з попаданням в об'єднаний зразок активних аерозольних частинок з атмосфери. Однак, коли той самий об'єднаний зразок (об'ємом $V = 6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3$) розділили на три рівні частини і визначили переохолодження, то воно знову виявилось рівним $\Delta t^- = 35 \pm 1^\circ\text{C}$. Якби в цьому процесі вирішальну роль грали тверді підкладки (нерозчинні домішки), то хоча б в одному з трьох зразків мала б залишитися тверда частинка, яка б призвела до меншого переохолодження. Але в жодному з аналогічних експериментів цього зафіксовано не було. З цього експерименту з розподілом та об'єднанням дослідного зразка сплаву Вуда слідує, що збільшення його переохолодження, при якому відбувається зародження кристалів, точно зумовлене не дезактивацією твердих підкладок у розплаві, а, найімовірніше, пов'язане зі зміною відносної концентрації розчинних домішок. Аналогічні результати були отримані й на інших досліджених модельних матеріалах (салол, камфен, дифеніламін, сплав Розе).

Для досліджених матеріалів отримані також інші дані, що підтверджують нашу гіпотезу про вирішальну роль обмежено розчинних домішок у залежності переохолодження металів перед кристалізацією від температури перегріву їх розплавів (рис. 3) [15].

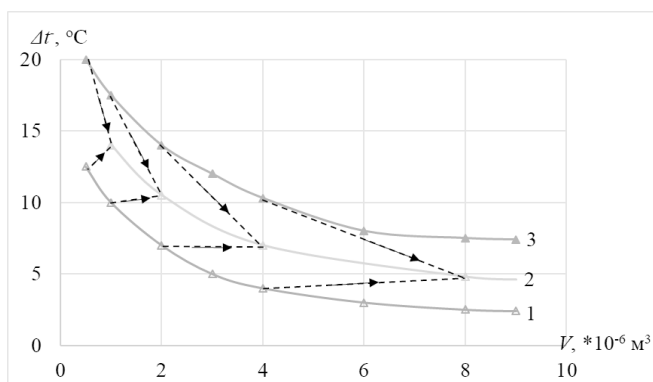


Рис. 3. Залежність переохолодження розплаву камфену від 'об'єму дослідного зразка: 1 — з перегрівом $\Delta t^+ = 10^\circ\text{C}$; 2 — зразки, отримані 'об'єднанням відповідних зразків з кривих 1 та 3

На рис. 3 наведено залежність переохолодження (Δt^-) розплаву камфену від об'ємів дослідних зразків для двох температур перегріву $\Delta t^+ = 10^\circ\text{C}$ (крива 1) та $\Delta t^+ = 25^\circ\text{C}$ (крива 3) за інших однакових умов проведення експериментів. Криву 2 на цих рисунках побудовано за даними випробувань зразків, отриманих об'єднанням двох однакових зразків розплавів, які були перегріті, відповідно, на 10°C та 25°C . Причому, перед об'єднанням температуру зразка, перегрітого на 25°C , повільно опускали до температури перегріву іншого зразка (тобто $\Delta t^+ = 10^\circ\text{C}$). Далі зразки об'єднували в одну пробірку (показано стрілками на рисунку) та визначали величину переохолоджень (Δt^-) об'єднаних зразків. У результаті було зафіксовано, що величини переохолодження нових об'єднаних зразків (рис. 3, крива 2) виявлялися вищими, ніж величини переохолоджень зразків, перегрітих на $\Delta t^+ = 10^\circ\text{C}$ (рис. 3, крива 1).

Здавалося б, який би обсяг не доливали до зразка, що дає менше переохолодження, активність механічних домішок або кристалів, які залишилися у порах на них, не повинна була змінитися. Однак для кристалізації всіх нових зразків (об'єднаних) необхідно було більше переохолодження. Це свідчить про те, що вплив перегріву на

величину переохолоджень розплавів камфену зумовлений саме зміною концентрації обмежено розчинних домішок у них.

У такому разі величина переохолодження повинна залежати від швидкості розігріву дослідного зразка, оскільки для дифузійного вирівнювання концентрації розчинних домішок по всьому його обсягу потрібен час. При проведенні відповідного експерименту для всіх дослідних сплавів було підтверджено, що їх переохолодження істотно залежить від швидкості розігріву за інших однакових умов (рис. 4) [15]. На цьому рисунку представлені криві залежності переохолодження розплаву салолу від швидкості їх розігріву та часу витримки у перегрітому стані. Бачимо, наприклад, що з підвищенням швидкості розігріву розплаву салолу з $2^\circ\text{C}/\text{хв.}$ до $30^\circ\text{C}/\text{хв.}$ при невеликій витримці у перегрітому стані ($\tau \leq 1$ хв.) його переохолодження знижується в 2 рази.

Розчинення домішок у розплаві будь-якого металу відбувається внаслідок дифузії, що є відносно тривалим у часі процесом. Для забезпечення однорідності розплаву металу необхідно забезпечити тривалішу його витримку в перегрітому стані. Дійсно, суттєве збільшення часу витримки розплаву салолу в перегрітому стані ($\tau \geq 40$ хв.) знівелювало цю залежність (рис. 4, пряма 4).

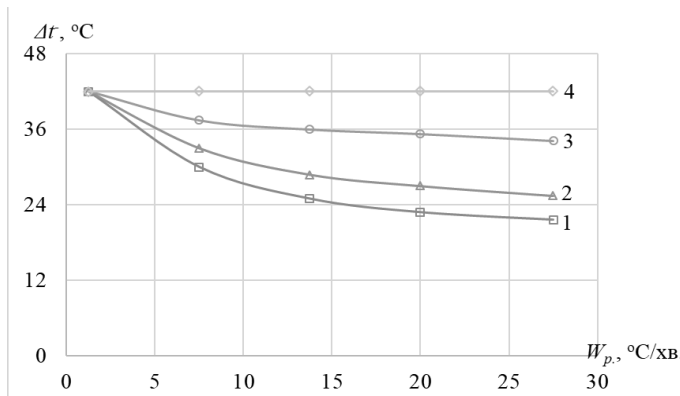


Рис. 4. Вплив швидкості розігріву дослідного зразка із салолу об'ємом $2 \times 10^{-7} \text{ м}^3$ на його переохолодження при перегріві $\Delta T^* = 25^\circ\text{C}$: 1 — $\tau_v = 1$ хв.; 2 — $\tau_v = 10$ хв.; 3 — $\tau_v = 20$ хв.; 4 — $\tau_v = 40$ хв.

Якщо виходити з цієї логіки, усе, що перешкоджатиме процесу дифузії домішок, має вплинути на переохолодження досліджуваних сплавів та середовищ. З цієї метою у розплав камфену об'ємом $2 \times 10^{-6} \text{ м}^3$ був доданий кварцовий порошок (діаметр частинок $0,2 \text{ мм}$) у пропорції 1:1 [15]. При цьому переслідувалося дві мети: по-перше, внесення додаткових центрів кристалізації (кожна частинка порошку теоретично має бути потенційним зародком у розплаві), а по-друге, створення механічних перешкод для дифузії домішок. Для активації частинок порошку кварцу було здійснено декілька перекристалізацій дослідних зразків. Висувалося припущення, що, якщо вплив перегріву на переохолодження розплаву зумовлений впливом механічних домішок, тоді після активації всіх частинок кварцу, які побували у затверділому камфені, мало зменшитися переохолодження. Але в жодному із багаторазово повторених дослідів цього не відбулося.

Однак при цьому присутність у дослідному зразку камфену частинок кварцу призвела до посилення залежності його переохолодження від часу витримки в перегрітому стані. На нашу думку, це зумовлено тим, що у зразках камфену з кварцовим порошком дифузія розчинних домішок ускладнюється як у процесі розігріву, так і при зниженні температури. Дійсно, було встановлено, що до досягнення часу витримки зразків камфену з порошком в перегрітому стані певного рівня їх переохолодження зменшувалися, порівняно з контрольним зразком, імовірно, через те, що домішки не встигали повністю розчинитись у розплаві. Але з перевищенням

часу витримки зразків у перегрітому стані цього рівня відбувалося збільшення їх переохолоджень. Логічно припустити, що зі збільшенням часу витримки домішки встигали повністю розчинятися у розплавах і для їх «зворотної дифузії» необхідно було більше часу з відповідним збільшенням переохолоджень зразків [15].

Найпереконливіші результати, що засвідчували вирішальну роль обмежено розчинних домішок у переохолодженні досліджуваних середовищ були отримані в експериментах з використанням методу мікрооб'ємів (≤ 100 мкм), коли вдалося виключити вплив безлічі неконтрольованих масштабних факторів, які зазвичай присутні при кристалізації великих об'ємів розплавів (неможливість управління тепло- та масообміном, наявність у них флуктуацій температур, густин, концентрацій домішок тощо) [14]. Для наочної демонстрації впливу домішок на переохолодження розплавів перед їх кристалізацією було використано одне й те саме середовище, тільки різної чистоти: парафін категорії чистоти «технічний» марки Т-1 ($\leq 95\%$) і високоочищений парафін марки П-1 ($\geq 99\%$). При цьому було встановлено, що переохолодження крапель із парафіну марки П-1 більш ніж на порядок (≥ 10 разів) було більше, ніж переохолодження крапель із «технічного» парафіну Т-1, що переконливо підтверджує вирішальну роль присутніх домішок у цьому процесі.

З огляду на сказане, зроблено припущення, що зовнішні силові впливи (вібрація, ультразвук тощо) можуть бути ефективними прийомами для керування процесом кристалізації досліджуваних матеріалів. Дійсно, для всіх досліджуваних сплавів та середовищ вплив пружних коливань (вібрації та ультразвуку) на дослідні зразки призводило до зменшення їх переохолоджень, при якому відбувалося зародження кристалів (рис. 5, табл. 1) [16]. При цьому ефективність впливу пружних коливань помітно підвищувалася із збільшенням об'ємів зразків. Такий характер залежності ΔT^* від V , мабуть, пов'язаний зі зміною кількості активних домішок зі збільшенням об'єму дослідних зразків. Очевидно, що чим більший об'єм зразка, тим вища ймовірність наявності в ньому домішок, здатних стати центрами кристалізації при мінімальному для нього переохолодженні.

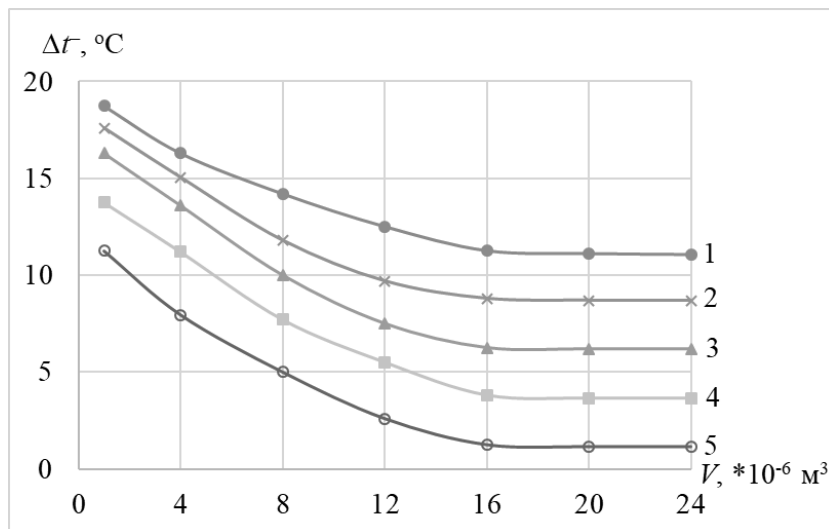


Рис. 5. Залежність переохолодження сплаву Вуда від об'єму дослідного зразка при перегріві $\Delta T^* = 10^\circ\text{C}$: 1 — контрольна крива; 2, 3 — зразки без домішок під впливом УЗ (2) і вібрації (3); 4, 5 — зразки з твердими домішками (5) під впливом УЗ (4) і вібрації (5)

Загалом із проведених досліджень випливає той факт, що для всіх модельних матеріалів вплив вібрації на їх переохолодження виявився сильнішим, ніж вплив ультразвуку. При цьому ефект від впливу пружних коливань обох типів відчутно вищий для дослідних зразків, у які були введені додаткові тверді підкладки —

кварцові піщинки та сталеві кульки (рис. 5, криві 4 і 5; табл. 1). В одному з варіантів експериментів у пробірки з дослідними зразками вводили певну кількість твердих частинок для імітації наявності в них нерозчинних механічних домішок (підкладок). У зразки з прозорих органічних середовищ додавали частинки з кварцу (розміром ~ 1 мм) у кількості 10 шт., а в металеві сплави (Вуда і Розе) — сталеві кульки ($\varnothing 1$ мм) у кількості 10 шт.

Таблиця 1

Вплив зовнішніх дій на переохолодження модельних матеріалів (для зразків об'ємом $V=16 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ при їх перегріванні $\Delta t^+ = 10^\circ \text{C}$) [16]

Порядковий номер	Матеріал	Переохолодження, Δt^+ , $^\circ \text{C}$		
		Спонтанне	Під дією вібрації $A = 0,5$ мм, $\nu = 50$ Гц, $P = 200$ Вт	Під дією ультразвуку $I = 2000$ Вт/м ²
1.	Сплав Вуда	12/12	4/2	8/6
2.	Сплав Розе	8/8	3/1	6/3
3.	Дифеніламін	21/21	7/2	9/3
4.	Камфен	14/14	4/2	6/3
5.	Салол	22/22	7/2	17/12

Примітка: у чисельнику — без домішок; у знаменнику — з домішками.

У літературі немає єдиної думки щодо механізму впливу пружних коливань на зародження кристалів у металах. Наводяться різні фактори, які грають вирішальну роль у процесі зародкоутворення в розплавах металів, а саме: зниження в'язкості і, відповідно, зменшення міжфазної енергії; поява флуктуацій температур та густин, пов'язаних з локальними змінами тисків у областях кавітації, стисків та розтягувань [12, 20]. З аналізу результатів цих досліджень можна стверджувати, що жоден із перерахованих факторів не є ключовим у зниженні переохолодження розплавів металів перед їх кристалізацією.

Для вивчення впливу пружних коливань на в'язкість дослідних середовищ були проведені експерименти, у яких за допомогою віскозиметру ВПЖ-2 визначено кінематичні в'язкості розплавів дослідних середовищ при температурах, близьких до їх $t_{\text{кр}}$. (рис. 6) [16]. Встановлено, що вплив пружних коливань не змінював в'язкість

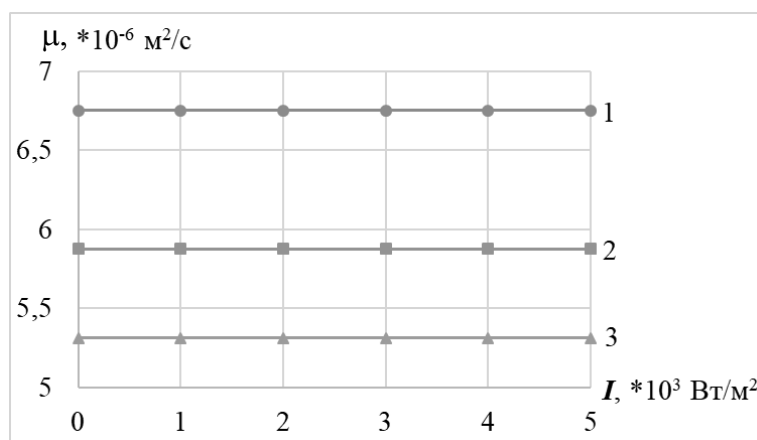


Рис. 6. Кінематична в'язкість модельних середовищ залежно від інтенсивності ультразвуку при $\Delta t^+ = 2^\circ \text{C}$: 1 — камфен; 2 — салол; 3 — дифеніламін

розплавів дослідних органічних середовищ. Відповідно, можна констатувати, що вплив пружних коливань на зародження кристалів у них не пов'язаний із зміною міжфазної енергії, яка безпосередньо залежить від в'язкості розплаву перед кристалізацією.

Ефективність впливу пружних коливань на переохолодження всіх середовищ підвищувалося зі збільшенням їх потужностей та об'ємів зразків, і ці залежності мали нелінійний характер (рис. 7). При цьому важливо відзначити, що перехід ультразвукових коливань із докавітаційного режиму до кавітаційного рівня ніяк не проявляється на їх характері. Точкою переходу ультразвуку від докавітаційного до кавітаційного рівня в даних експериментах було значення інтенсивності $I_k = 1500 \text{ Вт/м}^2$ (при частоті 15 кГц), визначене експериментально (рис. 7).

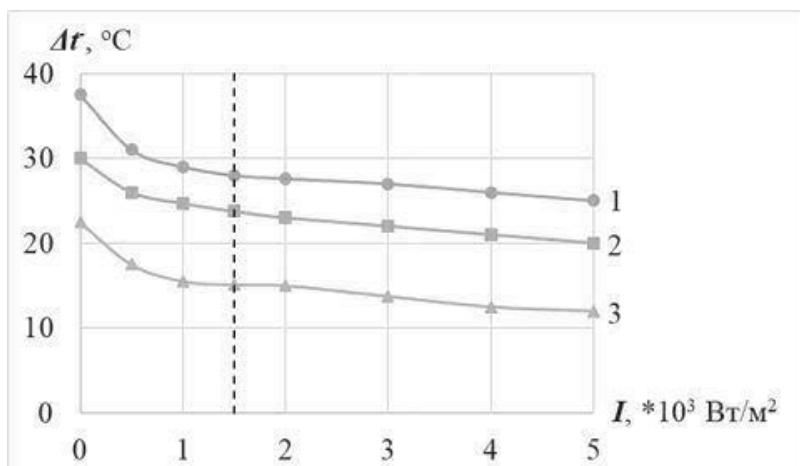


Рис. 7. Залежність переохолодження салолу від інтенсивності ультразвуку: 1 — $V = 10^{-6} \text{ м}^3$; 2 — $V = 8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$; 3 — $V = 20 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$

Якщо зміна температури кристалізації модельного середовища під кавітаційним тиском була б вирішальним фактором у зменшенні її переохолодження (Δt), то лінії 1–3 на рис. 7 в області кавітаційного режиму ультразвуку (тобто правіше пунктирної лінії) злилися б в одну лінію. Крім того, з позицій вирішальної ролі термодинаміки кавітаційного процесу неможливо пояснити характер кривих залежності Δt від I в області докавітаційного режиму ультразвуку (тобто лівіше пунктирної лінії). У цій області, незалежно від обсягу у кавітаційному режимі, їх переохолодження змінюється (зменшується) суттєвіше, ніж у кавітаційному режимі. При механізмі, у якому вирішальну роль відігравала б кавітація, все мало бути навпаки.

Якщо говорити про локальні зміни тиску в областях стисків і розтягувань пружних хвиль, то вони на понад порядок менші, порівняно з тисками, зумовленими кавітацією [21]. Тому флуктуації температур і густин, що з'являються у локальних зонах стиснення-розтягування розплавів металів під впливом пружних хвиль, тим більше неспроможні зіграти вирішальну роль у зародженні кристалів.

У формуванні структури литої металевої заготовки провідну роль відіграє співвідношення між параметрами її кристалізації: швидкістю зародкоутворення та лінійною швидкістю їх зростання. Так, у результаті візуальних спостережень у режимі онлайн за процесом тверднення прозорих модельних середовищ та аналізу кінцевих структур металевих зливок було встановлено, що вібрація істотно впливає на обидва параметри кристалізації й механізм впливу пружних коливань на формування структур литого металу полягає у прояві таких ефектів [16, 17]: по-перше, на початковому етапі у зливках відбувалося зародження стовпчастих кристалів на стінках форми, які під дією згинальних тисків пружних хвиль частково руйнувалися, а уламки,

завдяки вібраційному перемішуванню, рівномірно розподілялися по перерізу зливку, забезпечуючи в подальшому їх об'ємне тверднення. По-друге, як було встановлено вище на модельних сплавах, вплив пружними коливаннями на розплави, що тверднуть, підвищує швидкість зародження кристалів у них через те, що механічне тертя твердих підкладок між собою і зі стінками форм, а також кавітаційна ерозія створюють на поверхнях адсорбованих зародків ступені росту (дислокації). По-третє, поява переохолоджених (Δt) мікрооб'ємів розплаву навколо кожного плаваючого уламка кристалу сприяє появі додаткових центрів кристалізації в об'ємі зливку, що твердне.

Під впливом перелічених ефектів вібрації відбувається принципові зміни в кристалічній будові зливків (рис. 8 і 9). Якщо структури всіх контрольних зливків переважно складаються із зон стовпчастих кристалів, дисперсність яких визначається інтенсивністю тепловідведення, то макроструктури віброваних зливків, навпаки, в основному складаються з дисперсних рівноосних кристалів у центральній частині і невеликої зони дрібних стовпчастих кристалів на тепловідвідних поверхнях форм.

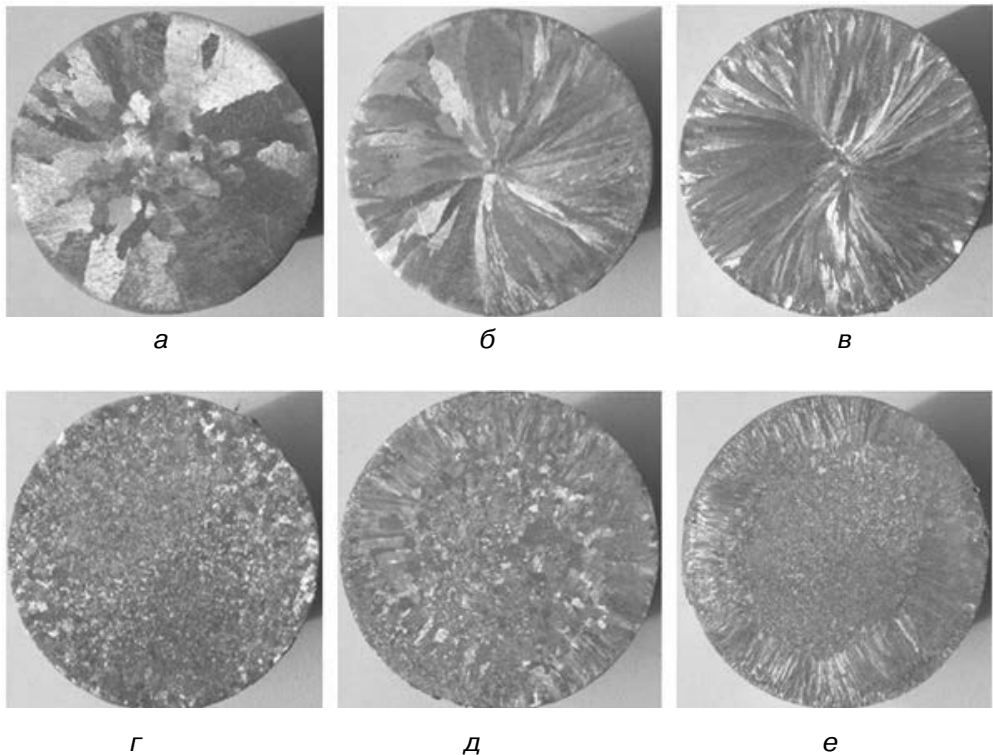


Рис. 8. Макроструктури зливків з алюмінію технічної чистоти А5: а, г — металева форма з $\delta = 1$ мм; б, д — металева форма з $\delta = 10$ мм; в, е — металева форма з $\delta = 20$ мм; а, б, в — без вібрації; г, д, е — під впливом вібрації: $A = 0,2$ мм; $\omega = 60$ Гц

Перелічені вище зміни в структурах зливків з обох сплавів під впливом вібрації зумовили відповідні зміни механічних характеристик металу в литому вигляді. Для визначення впливу вібрації на зниження анізотропії властивостей металу по перерізу зливків механічні характеристики були визначені в трьох зонах (поверхнева зона, $\frac{1}{2}$ радіуса, осьова зона) на середньому рівні за висотою. Механічні властивості були визначені за стандартними методиками, при цьому під впливом вібрації і міцність, і пластичність суттєво підвищується: для алюмінію технічної чистоти А5 — на 15–22 %; нержавіючої сталі 12Х18Н9Т — на 15–48 % та знижується анізотропія цих характеристик за перерізом зливків [17].

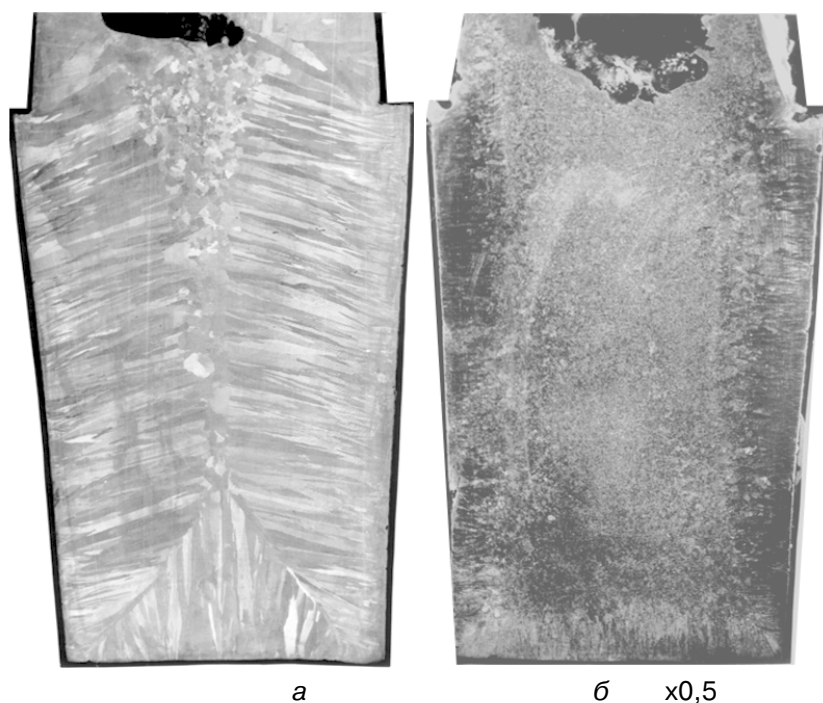


Рис. 9. Макроструктури зливків із нержавіючої сталі 12Х18Н9Т: а — без вібрації; б — під дією вібрації

Висновок

Отже, у результаті проведених досліджень доведено, що вплив температури перегріву металів при плавленні на ступінь їх переохолодження перед кристалізацією, імовірно, зумовлений залежністю концентрації наявних у них обмежено розчинних домішок від температури. Встановлено, що, змінюючи такі параметри плавлення та розливання металевих сплавів, як температура перегріву, час витримки в перегрітому стані, швидкості нагрівання та охолодження, можна керувати процесом зародкоутворення при їх твердненні.

Експериментально спростовано запропоновані в літературі гіпотези щодо механізму впливу пружних коливань на зародкоутворення: про зменшення міжфазної енергії переходу через зниження в'язкості металевих розплавів при температурах, близьких до температур їх кристалізації; про появу флуктуацій температур та густин у розплавах металів, пов'язаних із локальними змінами тисків в областях кавітації, пружних стисків та розтягувань. Доведено, що механізм впливу пружних коливань на зародкоутворення у розплавах металів полягає у підвищенні швидкості зародження кристалів через створення ступенів росту (дислокації) на поверхнях адсорбованих зародків при їх механічному терті між собою та зі стінками ливарних форм, а також їх кавітаційної ерозії.

Уточнено механізм впливу вібрації на формування кристалічних структур литих заготовок, який полягає в появі таких додаткових ефектів у процесах їх кристалізації: руйнування частини стовпчастих кристалів на поверхнях тепловідведення та розподіл цих уламків по об'єму розплаву в результаті його перемішування; підвищення швидкості зародження кристалів у розплавах металів; забезпечення постійного інтенсивного тепловідведення від розплаву, що твердне, за рахунок зниження товщини теплового бар'єру на стінках ливарних форм в результаті руйнування стовпчастих кристалів на них.

Список літератури

- 1 Овсиенко Д.Е. Зарождение и рост кристаллов из расплава. Киев: Наукова Думка. 1994. 256 с.
- 2 Оно А. Затвердевание металлов. Москва: Металлургия. 1980. 280 с.
- 3 Флемингс М. Процессы затвердевания. Москва: Мир. 1977. 423 с.
- 4 Ефимов В.А. Разливка и кристаллизация стали. Москва: Металлургия. 1976. 552 с.
- 5 Абрамов А.А., Ткаченко В.Г., Щерецкий А.А., Максимчук И.Н. и др. Особенности переохлаждения жидких металлических сплавов с различным химическим взаимодействием компонентов. *Электронная микроскопия и прочность материалов: Сб. научн. тр.* Київ: ІПМ НАН України, 2014. Вип. 20. С. 52–64.
- 6 Флемингс М.С. Процессы затвердевания. Москва: Мир, 1977. 423 с.
- 7 Чалмерс Б. Теория затвердевания. Москва.: Металлургия, 1968. 288 с.
- 8 Фольмер М. Кинетика образования новой фазы. Москва: Наука. 1986. 208 с.
- 9 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.
- 10 Eldarchanov, O. Figovsky Influence of Vibration on Continuously Cast Blooms. *Scientific Israel – Technological Advantages*. 2014. Vol. 16 (no. 1–2). S. 225–228.
- 11 Шейгам В.Ю., Прыгунова А.Г., Кошелев М.В. и др. Управление структурой отливки через открытую поверхность прибыли. *Процессы литья*. 2021. № 4. С. 30–40.
- 12 Campbell I. Effects of vibration during Solidification. *Internationale Metals Reviews*. 1981. №2. P. 71–108.
- 13 Нурадинов А.С., Ноговіцин О.В., Гончаров О.Л., Нурадінов І.А., Чистяков О.В., Зубеніна Н.Ф. Методика дослідження впливу перегріву на переохолодження металів та їх сплавів. *Процеси лиття*. 2024. № 3. С. 19–27.
- 14 Nuradinov A.S., Nogovitsyn A.V., Sirenko K.A., Nuradinov I.A., Chistyakov O.V., Derecha D.O. Physical Simulation of Nucleation and Crystallization Processes in Transparent Organic Media Melts. *Physica Scripta* 100 (2025) 035909 <https://doi.org/10.1088/1402-4896/adadb0>
- 15 Nuradinov A.S., Mazur V.L., Sirenko K.A., Chistyakov O.V., Nuradinov I.A. Influence of the superheating temperature of metal melts on their supercooling before crystallization. *Metalphysics and new technologies*. 2025. V. 47. №10. P. 1125–1136.
- 16 Нурадинов А.С., Чистяков О.В., Гончаров О.Л., Нурадінов І.А. Про механізм впливу пружних коливань на зародження кристалів у металах. *Процеси лиття*. 2026. № 1. С. 12–22.
- 17 Нурадинов А.С., Чистяков О.В., Нурадінов І.А. Структурутворення і властивості литих заготовок під впливом вібрації при кристалізації розплаву. *Металознавство та обробка металів*. 2025. № 4. С.
- 18 Jinku Y., Qi Q., Lian L., Qihua J., Dongying N. Investigation on the undercooling and crystallization of pure aluminum melt by DSC. *Phase Transitions*. 2010. Vol. 83, No. 7. P. 543–549.
- 19 Mei Q., Li J. Dependence of Liquid Supercooling on Liquid Overheating Levels of Al Small Particles. *Materials*. 2016. V. 9, No. 1, article 7. P. 1–8.
- 20 Смирнов А.Н., Пилюшенко В.Л., Момот С.В., Амитан В.Н. Затвердевание металлического расплава при внешних воздействиях. Донецк: Издательство «ВИК». 2002. 169 с.
- 21 Федоткин И.М., Гулый И.С. Кавитация, кавитационная техника и технология, их использование в промышленности (теория, расчеты и конструкции кавитационных аппаратов). Киев: Полиграфкнига. 1997. 940 с.

References

- 1 Ovsienko, D. E. (1994). *Nucleation and growth of crystals from melt*. Kyiv: Naukova Dumka. [in Russian].
- 2 Ono, A. (1980). *Solidification of metals*. M.: Metallurgiya. [in Russian].
- 3 Flemings, M. C. (1977). *Solidification processing*. Moscow: Mir. [in Russian].
- 4 Abramov, A. A., Tkachenko, V. G., Shcheretskiy, A. A., Maksymchuk, I. N., et al. (2014). Features of undercooling of liquid metallic alloys with different chemical interaction of components. *Elektronnaya mikroskopiya i prochnost materialov*, 20, 52–64. [in Russian].
- 5 Flemings, M. C. (1977). *Solidification processing*. Moscow: Mir. [in Russian].
- 6 Chalmers, B. (1968). *Theory of solidification*. Moscow: Metallurgiya. [in Russian].
- 7 Volmer, M. (1986). *Kinetics of new phase formation*. Moscow: Nauka. [in Russian].
- 8 Volmer, M. (1986). *Kinetics of new phase formation*. Moscow: Nauka. [in Russian].
- 9 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. *Protsessy lit'ya*, (5), 44–49. [in Russian].
- 10 Eldarchanov, A., & Figovsky, O. (2014). Influence of vibration on continuously cast blooms. *Scientific Israel – Technological Advantages*, 16(1–2), 225–228. [in English].
- 11 Eldarchanov, A., & Figovsky, O. (2014). Influence of vibration on continuously cast blooms. *Scientific Israel – Technological Advantages*, 16(1–2), 225–228. [in English].
- 12 Campbell, I. (1981). Effects of vibration during solidification. *Internationale Metals Reviews*, (2), 71–108. [in English].
- 13 Nuradinov, A. S., Nogovitsyn, O. V., Honcharov, O. L., Nuradinov, I. A., Chystiakov, O. V., & Zubenina, N. F. (2024). Methodology for investigating the influence of superheating on undercooling of metals and their alloys. *Protsesy lyttya*, (3), 19–27. [in Ukrainian].
- 14 Nuradinov, A. S., Nogovitsyn, A. V., Sirenko, K. A., Nuradinov, I. A., Chistyakov, O. V., & Derecha, D. O. (2025). Physical simulation of nucleation and crystallization processes in transparent organic media melts. *Physica Scripta*, 100, 035909. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/adadb0> [in English].
- 15 Nuradinov, A. S., Mazur, V. L., Sirenko, K. A., Chistyakov, O. V., & Nuradinov, I. A. (2025). Influence of the superheating temperature of metal melts on their supercooling before crystallization. *Metalphysics and New Technologies*, 47(10), 1125–1136. [in English].
- 16 Nuradinov, A. S., Chystiakov, O. V., Honcharov, O. L., & Nuradinov, I. A. (2026). On the mechanism of influence of elastic vibrations on crystal nucleation in metals. *Protsesy lyttya*, (1), 12–22. [in Ukrainian].
- 17 Nuradinov, A. S., Chystiakov, O. V., & Nuradinov, I. A. (2025). Structure formation and properties of cast billets under vibration influence during melt crystallization. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, (4). [in Ukrainian].
- 18 Jinku, Y., Qi, Q., Lian, L., Qihua, J., & Dongying, N. (2010). Investigation on the undercooling and crystallization of pure aluminum melt by DSC. *Phase Transitions*, 83(7), 543–549. [in English].
- 19 Mei, Q., & Li, J. (2016). Dependence of liquid supercooling on liquid overheating levels of Al small particles. *Materials*, 9(1), 1–8. [in English].
- 20 Smirnov, A. N., Pilyushenko, V. L., Momot, S. V., & Amitan, V. N. (2002). *Solidification of metallic melt under external influences*. Donetsk: VIK. [in Russian].

- 21 Fedotkin, I. M., & Gulyi, I. S. (1997). Cavitation, cavitation engineering and technology, and their industrial application (theory, calculations and designs of cavitation apparatuses). Kyiv: Poligrafkniga. [in Russian].
- 22 Fedotkin, I. M., & Gulyi, I. S. (1997). Cavitation, cavitation engineering and technology, and their industrial application (theory, calculations and designs of cavitation apparatuses). Kyiv: Poligrafkniga. [in Russian].

Одержано / Received 02.02.2026

Прийнято / Accepted 20.04.2026

Опубліковано / Publihed 29.05.2026

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

e-mail: nla_73@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-7286-8648>

O.V. Chystiakov, PhD Student; e-mail: chistyakov1971@gmail.com;

<https://orcid.org/0000-0002-7119-3562>

I.A. Nuradinov, PhD (Engin), Research Scientist; e-mail: inuradinov@gmail.com;

<https://orcid.org/0000-0001-8916-5247>

Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

INFLUENCE OF THERMAL-TIME TREATMENT AND ELASTIC VIBRATIONS ON THE CRYSTALLIZATION OF METAL ALLOYS

The paper is devoted to the study of crystallization processes and structure formation in metallic alloys, including under external thermomechanical action in the liquid state and during solidification. As the main approach, physical modeling methods were employed in these investigations. Low-melting (melting point $t \leq 100$ °C) Wood's and Rose's alloys and transparent organic media such as salol, camphene, and diphenylamine were used as objects of study. Various physical modeling techniques (microvolume method, flat and bulk specimen methods, etc.) were applied in the experiments to evaluate scale effects in the test samples. The studies carried out have disproved the surface and bulk crystallization theories reported in the literature, which relate the undercooling of liquid metal prior to crystallization to its superheating and to the mechanism of the influence of elastic vibrations on nucleation in metal melts. It has been shown that the effect of metal superheating temperature during melting on the degree of undercooling before crystallization is governed by the dependence of the concentration of sparingly soluble impurities present in the melt on temperature. It has been established that the mechanism of the influence of elastic vibrations on nucleation in metal melts consists in increasing the nucleation rate of crystals through the formation of growth steps (dislocations) on the surfaces of adsorbed nuclei due to their cavitation erosion and mechanical friction with each other and with the walls of the casting molds. The mechanism of the influence of vibration on the formation of crystalline structures of cast metal billets has been determined. It is based on the appearance of the following additional effects in their crystallization processes: partial destruction of columnar crystals on the heat-extracting surfaces and redistribution of their fragments throughout the melt volume as a result of vibrational mixing; an increase in the nucleation rate of crystals in metal melts; and the provision of continuously intensive heat extraction from the solidifying melt due to a reduction in the thickness of the thermal barrier on the mold walls caused by the destruction of columnar crystals on these surfaces.

Keywords: metallic alloys; organic media; impurities; superheating; undercooling; crystal nucleation; crystallization; elastic vibrations.