

УДК 669.017:536.421:534.6**А.С. Нурадинов**, докт. техн. н., 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>**О.Л. Гончаров**, канд. техн. наук., старш. наук. співроб.;alexgoncharov51@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-7183-8981>**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)

ПРО МЕХАНІЗМ ВПЛИВУ ПРУЖНИХ КОЛИВАНЬ НА ЗАРОДЖЕННЯ КРИСТАЛІВ У МЕТАЛАХ

Роботу присвячено дослідженню механізмів зародження кристалів у розплавах металів в умовах впливу пружних коливань. Для проведення досліджень застосовано метод фізичного моделювання, у яких як об'єкти вивчення використано низькотемпературні ($t_{пл.} \leq 100^\circ\text{C}$) металеві сплави Вуда й Розе та прозорі органічні середовища салол, камфен та дифеніламін. Експерименти проведено на об'ємних дослідних зразках в скляних пробірках ($\varnothing 8$ мм). Показано, що зовнішні силові впливи, зокрема вібрація та ультразвук, можуть бути ефективними прийомами для керування процесом кристалізації металів. Для всіх досліджуваних сплавів та середовищ вплив вібрації та ультразвуку на дослідні зразки призводив до зменшення переохолодження, при якому відбувалося зародження кристалів. При цьому ефект від впливу пружних коливань обох типів істотно вищий для дослідних зразків, у які були введені додаткові тверді підкладки (кварцові піщинки та сталеві кульки). У літературі описано різні фактори впливу пружних хвиль на зародження кристалів у розплавах металів, а саме: зниження в'язкості та, відповідно, зменшення міжфазної енергії; поява флуктуацій температур і густин, пов'язаних із локальними змінами тисків. На підставі отриманих результатів встановлено, що механізм впливу пружних хвиль (вібрації та ультразвуку) на первинне зародження кристалів у розплавах металів полягає в механічному впливі на адсорбовані кристалічні зародки на поверхнях підкладок (стінок форм, твердих домішок). Пружні коливання (вібрація та ультразвук) підвищує швидкість зародження кристалів через те, що механічне тертя твердих підкладок між собою і зі стінками ливарних форм, а також кавітаційна ерозія створюють на поверхнях адсорбованих зародків ступені росту (дислокації).

Ключові слова: металеві сплави, органічні середовища, переохолодження, зародження кристалів, кристалізація, ультразвук, вібрація.

Вступ

Розуміння фізичної сутності процесів зародження та зростання кристалів у розплавах є основою для управління формуванням структури та властивостей литих заготовок із металів. Тому проблемі зародження та зростання кристалів присвячена велика кількість теоретичних та експериментальних досліджень, у тому числі з вивчення зовнішніх фізичних впливів на ці процеси [1–3]. Є достатня кількість робіт, що підтверджують позитивний вплив пружних коливань (вібрації, ультразвуку) на процеси кристалізації металів [4–10]. Однак у деяких з них поставлено під сумнів ефективність впливу пружних коливань на зародження та зростання кристалів у металах [1, 2, 11]. Суперечливість результатів із цієї проблеми, на нашу думку, пов'язана з відсутністю

Стаття опублікована на умовах відкритого доступу за ліцензією CC BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

надійних методик фіксації моменту зародження кристалів у розплавах металів. Тому в роботі поставлено завдання створити методики дослідження зародження кристалів у розплавах металів, а також вивчити вплив пружних коливань на цей процес.

Матеріали та методика досліджень. При виробництві металургійних заготовок зазвичай відбувається кристалізація відносно великих обсягів металів. Дослідження механізмів зародження кристалів у таких об'єктах практично нереально через вплив безлічі неконтрольованих факторів, а саме: високу температуру і непрозорість розплавів металів, неможливості управління тепловими й гідродинамічними процесами тощо. Для вирішення цієї задачі широко використовують непрямі методи вивчення, зокрема метод фізичного моделювання, що й було зроблено в цій роботі. Об'єктами для досліджень були низькотемпературні металеві сплави Вуда (12,5 % олова, 12,5 % кадмію, 25 % свинцю, 50 % вісмуту) й Розе (25 % олова, 25 % свинцю, 50 % вісмуту) та прозорі органічні речовини дифеніламін ($C_{12}H_{11}N$), камфен ($C_{10}H_{16}$) та салол ($C_{13}H_{16}O_3$). Для вивчення впливу пружних коливань на процес зародкоутворення у розплавах модельних сплавів та середовищ розроблено методику та створено спеціальну експериментальну установку (рис. 1) [12].

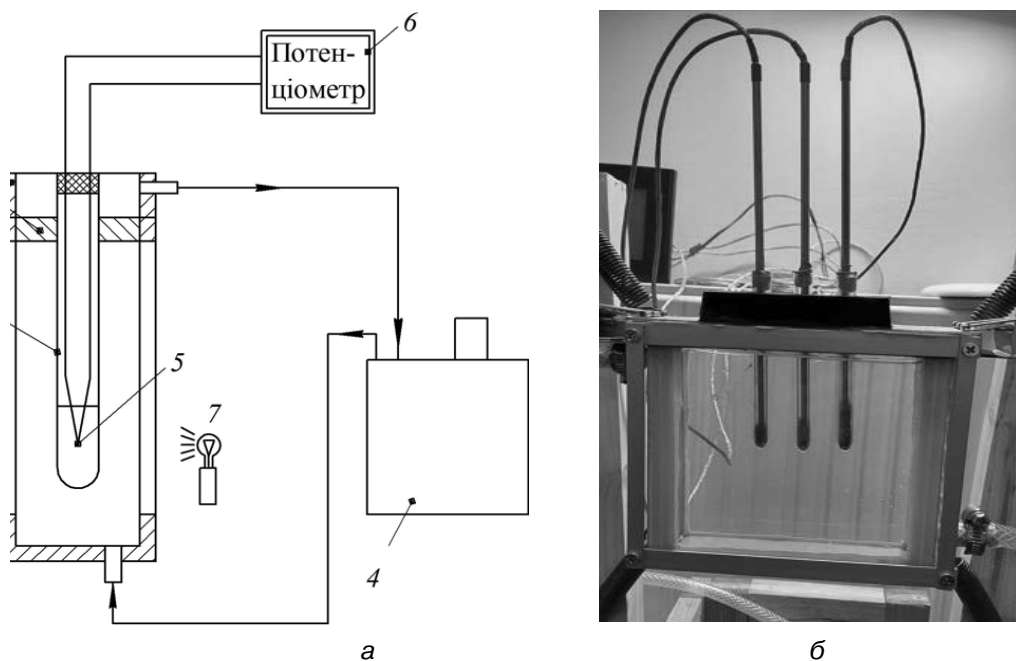


Рис. 1. Загальна схема експериментальної установки (а) та фото кювети з дослідними зразками середовищ у пробірках (б)

Експерименти проводили за такою методикою. Спочатку з кожного модельного матеріалу за допомогою електронних ваг (з точністю зважування $\pm 0,01$ г) готували по три дослідних зразки однакового об'єму в кварцових пробірках ($\varnothing$ 8 мм) і визначали переохолодження, при якому в них відбувається спонтанне зародження кристалів. Для забезпечення абсолютної ідентичності умов плавлення та кристалізації модельних сплавів усі три зразки 1 одночасно за допомогою касети 2 поміщали в кювету 3, у яку з термостата 4 подавався теплоносіє (вода) з необхідною температурою (достатньою для розплавлення та перегріву модельного сплаву до певного рівня). Після відповідної витримки зразків у перегрітому стані (2 хв) починали їх охолодження із заданою швидкістю. Для фіксації температури утворення кристалів у пробірці з дослідним середовищем 1 були встановлені термопари 5,

сигнал від яких у вигляді абсолютних значень температур у цифрах спостерігали на екрані цифрового потенціометра 6 та зберігали на карті пам'яті. За даними з карти пам'яті за допомогою ноутбука в спеціальній програмі отримували температурні криві охолодження розплавів дослідних матеріалів. За характерними ознаками на цих кривих (тобто при появі плат через виділення тепла кристалізації) визначали величину переохолодження розплаву, при якому відбувається зародження кристалів. У прозорих органічних середовищах за зародженням кристалів спостерігали ще й візуально. Для забезпечення покращення візуального спостереження за процесами кристалізації модельних середовищ кювету 3 просвічували ще світлом від лампи 7.

Аналогічно визначали переохолодження, при якому в дослідних зразках відбувається зародження кристалів, і під впливом пружних коливань (вібрації та ультразвуку). Для обробки дослідних зразків низькочастотними пружними коливаннями до нижньої частини кювети кріпили вібратор ексцентрикового типу. Для підведення ультразвукових коливань до зразків випромінювач хвиль опускали у воду в кюветі з пробірками. Параметри пружних коливань регулювалися в межах: вібрації — $A = 0 \div 1$ мм, $\nu = 0 \div 100$ Гц, $P_{\max} = 250$ Вт; ультразвуку — $A = 100 \div 200$ мкм, $\nu = 0 \div 38$ кГц, $I = 0 \div 5000$ Вт/м². В одному з варіантів експериментів у пробірці 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.

Обговорення результатів досліджень. Термодинамічним стимулом для переходу розплаву металу в твердий стан є різниця вільних енергій ΔG між рідкою G_p та твердою $G_{\text{тв}}$ його фазами. Ця різниця енергій є рушійною силою процесу кристалізації металу і дорівнює [13]:

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

де L — тепло кристалізації металу; Δt^- — переохолодження розплаву металу; $t_{\text{кр}}$ — рівноважна температура кристалізації металу.

Отже, із залежності (1) бачимо, що для кристалізації рідкого металу необхідне його переохолодження Δt^- , величина якого залежить від природи металу, його чистоти, температур перегріву і охолодження тощо. Тому температуру, при якій починається зародкоутворення у розплаві металу, не можна прийняти як його теплову характеристику, подібно $t_{\text{кр}}$. Зі сказаного випливає, що переохолодження є одним з основних параметрів процесу зародкоутворення в рідких металах, за зміною якого можна судити про ефекти домішок, зовнішніх впливів та інших факторів.

Відомо, що з підвищенням температури перегріву рідкого металу над температурою ліквідусу (Δt^+) відбувається збільшення переохолодження (Δt^-), при якому зароджуються кристали. У літературі розрізняють теорії поверхневої та об'ємної кристалізації, що пояснюють залежність переохолодження розплаву від перегріву [14, 15]. Згідно з першою теорією, кристалізація починається на поверхнях твердих підкладок (стінок ливарних форм, нерозчинних домішок, оксидних плівок тощо), а перегрів впливає на стан цієї поверхні. Друга теорія передбачає існування в розплаві металу мікрогрупувань атомів (кластерів), які зберігаються при невеликому перегріві розплаву над ліквідусом і слугують зародками при його кристалізації, але руйнуються при більших перегрівах. Проте обидві теорії не мають експериментального підтвердження для деяких металів (наприклад, алюмінієвих сплавів), у яких максимальні переохолодження досягаються при перегрівах понад 200–400 °C [14, 15].

Результати проведених нами експериментів показують, що вплив перегріву на переохолодження, найімовірніше, зумовлений станом обмежено розчинних домішок у розплавах металів [12, 16]. Ідеться про те, що з підвищенням температури розплаву зростає розчинність таких домішок, унаслідок чого змінюються його фізико-хімічні

властивості (рівноважна температура кристалізації, в'язкість, теплота фазового переходу, теплоємність тощо). У такому випадку, як правило, відбувається зміщення межі метастабільності в область менших переохолоджень, що ми й підтвердили експериментально на прозорих модельних середовищах (дифеніламін, салол). Було встановлено, що при температурах перегріву вище певного рівня їх розплави помітно змінювали свій колір, тобто в них, імовірно, відбувалися незворотні процеси. При цьому температури плавлення (кристалізації) цих середовищ знижувалися в залежності від температур їх перегріву на 2–4°C [12].

З огляду на сказане було зроблено припущення, що зовнішні силові впливи (вібрація, ультразвук тощо) можуть бути ефективними прийомами для керування процесом кристалізації металів. Дійсно, для всіх досліджуваних сплавів та середовищ вплив пружних коливань (вібрації та ультразвуку) на дослідні зразки призводив до зменшення переохолодження, при якому відбувалося зародження кристалів (рис. 2 і 3). При цьому ефективність впливу пружних хвиль помітно підвищувалася із збільшенням об'ємів зразків. Бачимо, що для обох середовищ величина максимального переохолодження (Δt^-) зі збільшенням об'єму зразка (V) спочатку різко падає. Потім, із перевищенням певного значення V практично виходить на плато, тобто $\Delta t^- \sim \text{const}$. Отриманий характер залежності Δt^- від V , імовірно, пов'язаний зі зміною кількості активних домішок при збільшенні 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.

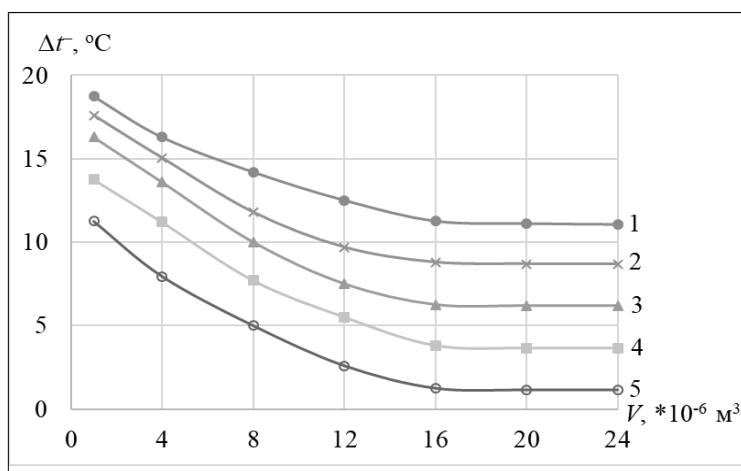


Рис. 2. Залежність переохолодження сплаву Вуда від об'єму дослідного зразка при перегріві $\Delta t^+ = 10^\circ\text{C}$: 1 — контрольна крива (без впливів); 2, 4 — зразки без твердих домішок (2) і з твердими домішками (4) під впливом УЗ потужністю $I = 2000 \text{ Вт/м}^2$; 3, 5 — зразки без твердих домішок (3) і з твердими домішками (5) під дією вібрації $A = 0,5 \text{ мм}$, $\nu = 50 \text{ Гц}$ та $P = 200 \text{ Вт}$

Загалом, із проведених досліджень видно, що для всіх модельних матеріалів вплив вібрації на їх переохолодження виявився сильнішим, ніж вплив ультразвуку (рис. 2 і 3; табл. 1). При цьому ефект від впливу пружних коливань обох типів істотно вищий для дослідних зразків, у які були введені додаткові тверді підкладки — кварцові піщинки та сталеві кульки (рис. 2 і 3, криві 4 і 5; табл. 1).

У літературі немає єдиної думки щодо механізму впливу пружних хвиль на зменшення переохолодження перед кристалізацією (тобто на зародження кристалів) у металах. Тут наведено різні фактори, які відіграють 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

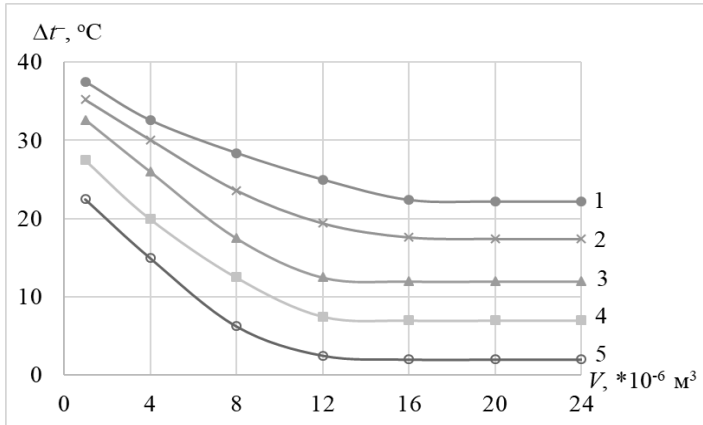


Рис. 3. Залежність переохолодження салолу від об'єму дослідного зразка при перегріві $\Delta t^* = 10^\circ\text{C}$: 1 — контрольна крива (без впливів); 2, 4 — зразки без твердих домішок (2) і з твердими домішками (4) під впливом УЗ потужністю $I = 2000 \text{ Вт/м}^2$; 3, 5 — зразки без твердих домішок (3) і з твердими домішками (5) під дією вібрації $A = 0,5 \text{ мм}$, $\nu = 50 \text{ Гц}$ та $P = 200 \text{ Вт}$

Таблиця 1
Вплив зовнішніх дій на переохолодження модельних матеріалів
(для зразків об'ємом $V=16 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ при їх перегріванні $\Delta t^* = 10^\circ\text{C}$)

№ п/п	Матеріал	Переохолодження, $\Delta t^-, ^\circ\text{C}$		
		Спонтанне	Під дією вібрації $A = 0,5 \text{ мм}$, $\nu = 50 \text{ Гц}$, $P = 200 \text{ Вт}$	Під дією ультразвуку $I = 2000 \text{ Вт/м}^2$
1	Сплав Вуду	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 — для зразків без механічних домішок; у знаменнику — для зразків із механічними домішками.

із локальними змінами тисків в областях кавітації, стисків та розтягувань [11, 13]. З аналізу результатів цих досліджень можна стверджувати, що жоден із перерахованих факторів, на нашу думку, не є ключовим у зниженні переохолодження розплавів металів перед кристалізацією.

Для встановлення впливу пружних коливань на в'язкість дослідних середовищ проведено такий експеримент. Віскозиметр ВПЖ-2 із розплавом дослідних середовищ поміщали в кювету (рис. 1) та піддавали впливу пружних коливань (вібрації й ультразвуку) при температурах води, близьких до їх $t_{\text{кр}}$. Кінематичну в'язкість (μ) розраховували за такою формулою [17]:

$$\mu = C_v \frac{g}{980 \cdot 1} \cdot \tau, \tag{2}$$

де C_v — постійна віскозиметра; g — прискорення вільного падіння; τ — час збігу середовища.

На рис. 4 показано залежність кінематичної в'язкості дослідних органічних середовищ (дифеніламіну, салолу та камфену) від інтенсивності ультразвуку.

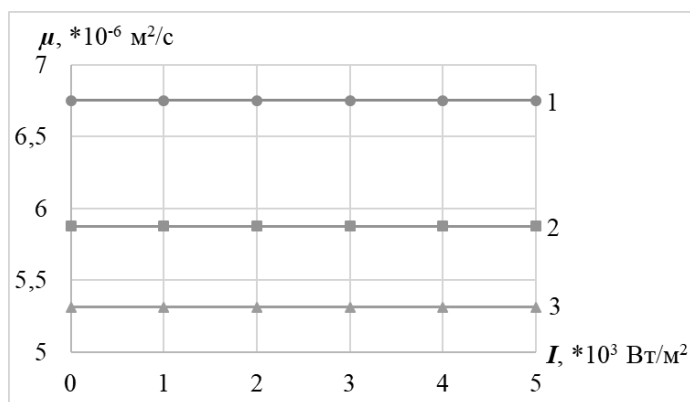


Рис. 4. Кінематична в'язкість модельних середовищ залежно від інтенсивності ультразвуку при $\Delta t^* = 2^\circ\text{C}$: 1 — камфен; 2 — салол; 3 — дифеніламін

Бачимо, що вплив ультразвуку різних інтенсивностей не змінює в'язкості розплавів цих середовищ при температурах, близьких до температур їх кристалізації. Аналогічно до ультразвуку, вібраційний вплив різних потужностей теж не вплинув на кінематичну в'язкість розплавів модельних середовищ. Отже, 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 [13].

Ефективність впливу обох типів пружних коливань на переохолодження усіх середовищ також підвищується зі збільшенням їх потужностей (рис. 5 і 6). Ці залежності не є лінійними і мають однаковий характер змін для всіх об'ємів. Крім того, як було зазначено вище, зразки більшого об'єму більш чутливі до цих впливів через збільшення кількості активних домішок у них. При цьому важливо відзначити, що перехід ультразвукових коливань із докавітаційного режиму до кавітаційного рівня ніяк не впливає на характер залежності переохолодження від їх інтенсивності (рис. 5). 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), що була визначена експериментально. При інтенсивності ультразвуку $I < I_k$ на фользі, опушеної у воду в кюветі, не виникало вм'ятин та дірок, що свідчило б про кавітацію. Але при $I > I_k$ на фользі виникали дірки і вм'ятини, що вказують про перехід у кавітаційний режим.

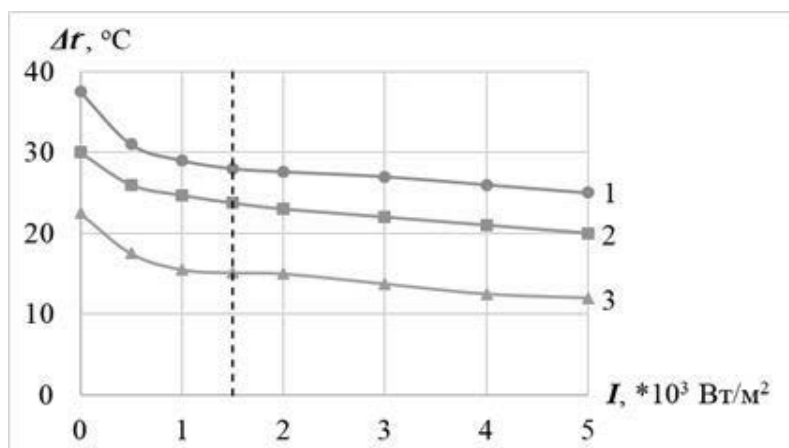


Рис. 5. Залежність переохолодження салолу від інтенсивності ультразвуку: 1 — $V = 10^{-6} \text{ м}^3$; 2 — $V = 8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$; 3 — $V = 20 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$

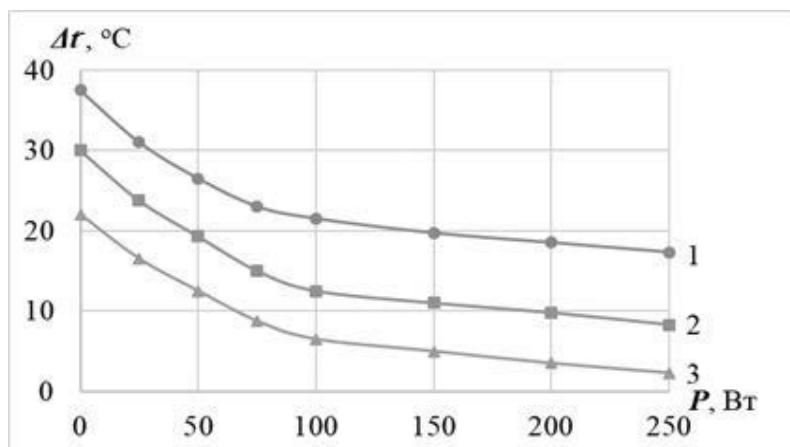


Рис. 6. Залежність переохолодження салолу від потужності вібрації:
1 – $V = 10^{-6} \text{ м}^3$; 2 – $V = 8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$; 3 – $V = 20 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$

Якщо зміна температури плавлення (кристалізації) модельного середовища, зумовлена кавітаційним тиском, була б вирішальним фактором у зменшенні її переохолодження (Δt^-), то лінії 1–3 на рис. 5 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). Тут, незалежно від обсягу зразків, при інтенсивності ультразвуку, коли кавітації немає, переохолодження змінюється (зменшується) швидше, 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 більше, ніж на порядок менші за тиски, зумовлені, кавітацією [18]. 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.

На підставі наведених результатів можна припустити, що механізм впливу пружних хвиль (вібрації, ультразвуку тощо) на первинне зародження кристалів у розплавах металів полягає у механічному впливі на адсорбовані кристалічні зародки на поверхнях підкладок (домішок), які існують у всіх реальних сплавах. Активация твердих підкладок або, інакше кажучи, фізична адсорбція атомів на стінках ливарних форм, тугоплавких нерозчинних частинках тощо є фактом загальноновизнаним. Їх розміри можуть бути на два-три порядки більші, ніж теоретичні значення критичного радіусу зародків [13, 19]. Однак навіть такі порівняно великі кристалічні зародки, що утворилися внаслідок адсорбції атомів на деякій поверхні, при малих переохолодженнях ростуть не завжди. Імовірність того, що адсорбовані зародки стануть центрами кристалізації, залежить від наявності на їх поверхнях ступенів для подальшого зростання. На нашу думку, за інших рівних умов така ймовірність під зовнішніми фізичними впливами на розплави металів зростає.

У літературі зародження кристалів на поверхнях підкладок у розплавах металів передбачається флуктуаційним, тобто зумовленим випадковим відривом і приєднанням блукаючих атомів [13, 19]. Раніше нами показано, що утворення зародків та їх зростання відбувається не з об'ємної рідини, а з поверхневого шару, що робить більш імовірним дислокаційний механізм. При цьому встановлено, що тертя твердих поверхонь, змочених переохолодженим розплавом, є ефективним прийомом впливу на адсорбовані на них кристалічні зародки [16].

Вплив пружних коливань на розплав металу викликає його перемішування і

максимальне значення градієнта швидкості (ΔW_m) при цьому визначається з такої формули [11]:

$$\Delta W_m = \frac{4 \cdot \pi \cdot A_K}{3 \cdot \lambda}, \quad (3)$$

де A_K — амплітуда пружних хвиль; λ — довжина хвилі.

На нашу думку, при такому примусовому перемішуванні розплаву металу відбувається перенесення механічних домішок, що містяться в ньому, та їх зіткнення один з одним та зі стінками ливарних форм. У результаті цих зіткнень на поверхнях адсорбованих зародків через їх механічне руйнування з'являються ступені росту (дислокації). Тому присутність у розплавах досліджуваних модельних матеріалів додаткових твердих підкладок у вигляді кварцових піщинок та сталевих кульок підвищує ефективність впливу і вібрації, і ультразвуку (рис. 2 і 3; табл. 1). Більш ефективний вплив вібрації (порівняно з ультразвуком) на зародкутворення в модельних сплавах та середовищах зумовлений різною інтенсивністю перемішування їх розплавів (за формулою 3). Крім того, невід'ємним супутнім ефектом впливу пружних коливань на розплави металів є кавітація. І якщо кавітація відбувається в безпосередній близькості від твердих підкладок, то внаслідок ерозійного руйнування адсорбованих зародків на їхніх поверхнях, імовірно, також з'являються ступені (дислокації) для їх росту.

Висновок

Таким чином, на підставі результатів цих досліджень встановлено, що в розплавах реальних металів можуть існувати адсорбовані на твердих підкладках кристалічні зародки, здатні зростати при значно менших переохолодженнях, ніж спонтанні переохолодження, якщо механічно вплинути на їхню поверхню. Вплив пружними коливаннями (вібрацією та ультразвуком) на розплави металів у процесі їх охолодження підвищує швидкість зародження кристалів через те, що механічне тертя твердих підкладок між собою і зі стінками ливарних форм, а також кавітаційна ерозія створюють на поверхнях адсорбованих зародків ступені росту (дислокації). Аналогічний вплив на зародкутворення в розплавах металів може мати будь-який фізичний вплив, що викликає їх перемішування. При цьому їх вплив буде більш ефективним, якщо в розплавах металів виявиться більше твердих підкладок, здатних механічно впливати на поверхні адсорбованих зародків.

Список літератури

- 1 Оно А. Затвердевание металлов. Москва: Металлургия. 1980. 280 с.
- 2 Флемингс М. Процессы затвердевания. Москва: Мир. 1977. 423 с.
- 3 Ефимов В.А. Разливка и кристаллизация стали. Москва: Металлургия. 1976. 552 с.
- 4 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.
- 5 Нурадинов А.С., Ноговицын А.В., Нурадинов И.А., Зубенина Н.Ф. Внешнеэтермосиловое воздействие как фактор управления формированием структуры литых заготовок. *Процессы литья*. 2019. №4. С. 11–19.
- 6 Нурадинов А.С., Ноговицын А.В., Нурадинов И.А., Зубенина Н.Ф. Внешнее 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.
- 7 Idarchanov, Figovsky O., Nuradinov A. Influence of Vibration on Continuously Cast 8Bblooms. *Scientific Israel — Technological Advantages*. 2014. Vol. 16 (no. 1–2). S. 225–228.
- 8 Нурадинов А.С., Нарівський А.В., Нурадінов І.А. та інші. Процеси структуроутворення в сталевих злитках при теплосилових діях на метал. *Процеси лиття*. 2021. № 4. С. 22–30.

- 9 Шейгам В.Ю., Пригунова А.Г., Кошелєв М.В., Нурадинов А.С. та інші. Управління структурою виливка через відкриту поверхню надливу. *Процеси лиття*. 2021. № 4. С. 30–40.
- 10 Nuradinov A.S., Nogovitsyn A.V., Nuradinov I.A. and oth. Research of possibility of control of the formation of crystal structure of metal alloys. *Science and innovation*. 2020. Vol. 16 (4). S. 67–73.
- 11 Campbell I. Effekts of vibration during Solidification. *Internationale Metals Reviers*. 1981. №2. P. 71–108.
- 12 Чистяков О.В., Нурадинов А.С., Ноговіцин О.В., Сіренко К.А, Баранов І.Р., Нурадінов І.А. Методика дослідження механізмів зародження кристалів у розплавах металів в залежності від їх обсягу та форми. *Металознавство та обробка металів*. 2025. №2. С. 47–58.
- 13 Овсиенко Д.Е. Зарождение и рост кристаллов из расплава. Київ: Наукова думка. 1994. 256 с.
- 14 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.
- 15 Mei Q., Li J. Dependence of Liquid Supercooling on Liquid Overheating Levels of Al Small Particles. *Materials*. 2016. Vol. 9, No. 1, art. 7. P. 1–8.
- 16 Межидов В.Х., Нурадинов А.С., Эльдарханов А.С., Таранов Е.Д. О механизме образования и роста кристаллических зародышей в расплавах. *Процессы литья*. 2010. №6. С. 3–7.
- 17 ДСТУ EN ISO 3104:2022 Нафтопродукти. Прозорі та непрозорі рідини. Визначення кінематичної в'язкості та обчислення динамічної в'язкості.
- 18 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.
- 19 Фольмер М. Кинетика образования новой фазы. Москва: Наука. 1986. 208 с

References

- 1 Ono, A. (1980). Solidification of metals. *Metallurgiya*. [in Russian].
- 2 Flemings, M. C. (1977). Solidification processing. Mir. [in Russian].
- 3 Efimov, V. A. (1976). *Steel casting and crystallization*. *Metallurgiya*. [in Russian].
- 4 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].
- 5 Nuradinov, A. S., Nogovitsyn, A. V., Nuradinov, I. A., & Zubenina, N. F. (2019). External thermomechanical action as a factor in controlling the formation of cast billet structure. *Protsessy lit'ya*, (4), 11–19. [in Russian].
- 6 Nuradinov, A. S., Prygunova, A. G., Sheigam, V. Yu., Vernidub, A. G., & Nuradinov, I. A. (2020). Physical methods for controlling metal structure formation. *Metal i lit'e Ukrainy*, (2), 64–71. [in Russian].
- 7 Eldarchanov, A., Figovsky, O., & Nuradinov, A. (2014). Influence of vibration on continuously cast blooms. *Scientific Israel – Technological Advantages*, 16(1–2), 225–228. [in English]
- 8 Nuradinov, A. S., Narivskiy, A. V., Nuradinov, I. A., et al. (2021). Structure formation processes in steel ingots under thermomechanical action on solidifying metal. *Protsessy litty*, (4), 22–30. [in Ukrainian].
- 9 Sheigam, V. Yu., Prygunova, A. G., Koshelev, M. V., Nuradinov, A. S., et al. (2021). Control of casting structure through the open riser surface. *Protsessy litty*, (4), 30–40. [in Ukrainian].
- 10 Nuradinov, A. S., Nogovitsyn, A. V., & Nuradinov, I. A. (2020). Research on the possibility of controlling the formation of crystal structure of metal alloys. *Science and Innovation*, 16(4), 67–73. [in English].

- 11 Campbell, I. (1981). Effects of vibration during solidification. *International Metals Reviews*, (2), 71–108. [in English].
- 12 Chystiakov, O. V., Nuradinov, A. S., Nogovitsyn, O. V., Sirenko, K. A., Baranov, I. R., & Nuradinov, I. A. (2025). Methodology for studying crystal nucleation mechanisms in metal melts depending on their volume and shape. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, (2), 47–58. [in Ukrainian].
- 13 Ovsienko, D. E. (1994). Nucleation and growth of crystals from the melt. *Naukova Dumka*. [in Russian]
- 14 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].
- 15 Mei, Q., & Li, J. (2016). Dependence of liquid supercooling on liquid overheating levels of Al small particles. *Materials*, 9(1), Article 7, 1–8. [in English].
- 16 Mezhidov, V. Kh., Nuradinov, A. S., Eldarkhanov, A. S., & Taranov, E. D. (2010). On the mechanism of formation and growth of crystal nuclei in melts. *Protsessy lit'ya*, (6), 3–7. [in Russian].
- 17 DSTU EN ISO 3104:2022. (2022). Petroleum products. Transparent and opaque liquids. Determination of kinematic viscosity and calculation of dynamic viscosity. [in Ukrainian].
- 18 Fedotkin, I. M., & Gulyi, I. S. (1997). Cavitation, cavitation equipment and technology and their industrial applications. *Poligrafkniga*. [in Russian].
- 19 Volmer, M. (1986). Kinetics of new phase formation. *Nauka*. [in Russian].

Одержано / Received 18.12.2025

Прийнято / Accepted 23.02.2026.

Опубліковано / Published 17.03.2026.

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>

O.L. Goncharov, PhD (Engin) Research Scientist; alexgoncharov51@gmail.com;
<https://orcid.org/0000-0002-7183-8981>

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)

ON THE MECHANISM OF THE INFLUENCE OF ELASTIC OSCILLATIONS ON CRYSTAL NUCLEATION IN METALS

The present work is devoted to the investigation of the mechanisms of crystal nucleation in metal melts under the influence of elastic oscillations. The studies were carried out using the method of physical modeling, in which low-temperature metallic alloys (melting temperature $\leq 100^\circ\text{C}$), namely Wood's and Rose's alloys, as well as transparent organic media such as salol, camphene, and diphenylamine, were used as model materials. The experiments were performed on bulk specimens placed in glass tubes with a diameter of 8 mm. The results demonstrate that external force effects, in particular vibration and ultrasound, can serve as effective methods for controlling the crystallization process of metals. For all investigated alloys and media, the application of vibration and ultrasonic treatment to the experimental samples resulted in a reduction of the degree of undercooling at which crystal nucleation occurred. Moreover, the effect of elastic oscillations of both types was significantly more pronounced in samples containing additional solid substrates, such as quartz sand particles and steel balls. The literature reports various factors influencing crystal nucleation in metal melts under elastic wave action, including a decrease in viscosity and, consequently, a reduction in

interfacial energy, as well as the occurrence of temperature and density fluctuations associated with local pressure variations. Based on the obtained experimental results, it was established that the mechanism of influence of elastic waves (vibration and ultrasound) on primary crystal nucleation in metal melts is associated with mechanical action on adsorbed crystalline nuclei located on substrate surfaces (mold walls and solid inclusions). Elastic oscillations enhance the nucleation rate due to mechanical friction between solid substrates and mold walls, as well as cavitation erosion, which leads to the formation of growth steps (dislocations) on the surfaces of adsorbed nuclei.

Keywords: metal alloys; organic media; undercooling; crystal nucleation; crystallization; ultrasound; vibration.

До уваги авторів

У зв'язку з переходом журналу «Процеси лиття» на новітню платформу Open Journal Systems та відповідним оновленням сайту журналу подача статей можлива через сайт <https://plit-periodical.org.ua/>

Після реєстрації в системі вам буде запропоновано покрокову процедуру завантаження статті за стандартами міжнародних журналів.

Спілкування з редакцією та подання статей здійснюється через пошту **plit.periodical@gmail.com**

Редакція журналу «Процеси лиття»