

ВПЛИВ ВІБРАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ НА СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ТА ВЛАСТИВОСТІ ЗАЕВТЕКТИЧНОГО СИЛУМІНУ

Анотація. У статті представлено результати комплексного дослідження впливу вібраційної обробки на процеси кристалізації, структуроутворення та зміну властивостей заевтектичного силуміну. Для дослідження обрано зразки алюмінієвого сплаву системи Al-Si, у яких евтектичний кремній присутній у вигляді тонких пластин завтовшки від 0,5 до 10 мкм. Для відтворення керованих умов кристалізації використовували відливки у графітових тиглях. На стадії твердіння до розплаву прикладали вібраційні коливання у частотному діапазоні 20...300 Гц, що дозволило дослідити ефекти від низькочастотного биття до резонансних і надрезонансних режимів. Встановлено, що вже за частоти 20 Гц тонкі пластини кремнію зазнають пошкоджень, частково відокремлюються та формують зародки псевдопервинних кристалів. Найбільш виражені зміни відбуваються за частоти коливань 50 Гц, коли реалізується резонансна взаємодія коливань із розплавом. У цьому режимі спостерігається масове руйнування пластин, посилений ріст бічних граней кристалів, формування об'ємної частки псевдопервинних кристалів та поява характерного «ободка» навколо них. Рентгеноструктурні дослідження засвідчили виникнення додаткових відбитків, ідентифікованих як гексагональна модифікація кремнію, яка утворюється за аналогією з відомим переходом кубічної алмазної решітки в лонсдейліт. Виявлено, що наявність гексагональної фази сприяє підвищенню мікротвердості сплаву. За умови подальшого зростання частоти коливань до 300 Гц ефекти руйнування пластин значно послаблюються, а у структурі з'являються політипні форми кремнію, що характеризуються зниженою твердістю. Це призводить до загального зменшення зміцнюючого ефекту вібраційної обробки. У результаті дослідження встановлено нелінійну залежність між частотою прикладених вібрацій та морфологічними й фазовими перетвореннями у системі Al-Si. Резонансна обробка виявилася найбільш ефективною для цілеспрямованого подрібнення структури та покращення властивостей заевтектичного силуміну. Отримані результати можуть бути використані для розробки технологій керування кристалізацією алюмінієвих



сплавів у ливарному виробництві з метою підвищення їх механічних і експлуатаційних властивостей.

Ключові слова: алюмінієві сплави, заевтектичний силумін, евтектичний кремній, вібраційна обробка, фазові перетворення, мікротвердість, структуроутворення.

Посилання для цитування: Ротт Н. О., Сазанішвілі З. В. Вплив вібраційної обробки на структуроутворення та властивості заевтектичного силуміну. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2025. Вип. 39. С. 264-273. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2025-39-15>

Вступ. Силуміни – сплави алюмінію з кремнієм, які широко використовуються в автомобільній та авіаційній промисловості завдяки високій міцності, корозійній стійкості та низькій щільності. Евтектичне твердіння в цих сплавах визначає морфологію евтектичного кремнію, яка суттєво впливає на механічні властивості. Традиційно зміни структури досягається хімічними добавками – модифікаторами – або швидким охолодженням, але дослідження показують ефективність механічної вібрації для подрібнення евтектичної фази [1].

Механічні вібрації під час кристалізації алюмінієвих сплавів системи Al-Si широко вивчаються як засіб контролю мікроструктури [2 – 4]. Основний вплив вібрацій полягає у зміні форми та розмірів евтектичних пластин кремнію. Під дією вібрацій зазвичай спостерігається зменшення товщини пластин і перетворення їх із ламелярної фази у більш волокнисту або сфероїдальну. Цей ефект пов'язаний із посиленням дифузії, порушенням фронту кристалізації і механічною руйнацією тонких структур.

Вплив частоти і амплітуди вібрацій є критичним, наприклад, надмірна амплітуда може призводити до агрегації або коагуляції частинок, тоді як достатня амплітуда сприяє рівномірному подрібненню і кращому розподілу кремнію в системі. Окрім того, вібрації сприяють зниженню пористості та формуванню більш однорідної структури, що позитивно впливає на механічні властивості сплавів – підвищується міцність, твердість і пластичність [5].

Структурні зміни кремнію під впливом механічних збурень включають трансформації його кристалічної структури. Хоча основна форма кремнію у силумінах – кубічна алмазоподібна решітка, наукові роботи [6, 7] виявили утворення гексагональних та політипних модифікацій кремнію, які демонструють змінені фізико-механічні характеристики, такі як підвищена твердість і зміни електронних властивостей. Такі поліморфні переходи можуть бути індуковані як механічним навантаженням, так і термічними ефектами під час

швидкого охолодження.

Методи рентгенівської дифракції (XRD) грають ключову роль у вивченні таких структурних змін, дозволяючи виявити появу нових дифракційних ліній і диференціювати між різними фазами кремнію, що модифікуються в процесі обробки. Зафіксовані фазові переходи тісно корелюють з підвищенням міцності матеріалів, що також підтверджують експериментальні дослідження механічних властивостей.

Таким чином, застосування вібраційної обробки під час кристалізації силумінів дозволяє керувати морфологією кремнію та його поліморфізмом, що значно впливає на механічні характеристики готових виробів. Однак оптимальні параметри вібрації (частота, амплітуда, режим) залежать від конкретних систем і конструктивних умов, що визначає актуальність подальших досліджень у цій галузі.

Метою даного дослідження є встановлення закономірностей впливу вібраційної обробки під час кристалізації заевтектичного силуміну на руйнування та перебудову евтектичних структур, утворення псевдопервинних кристалів кремнію і фазові перетворення в системі «Al–Si», а також визначення кореляції між структурними змінами та механічними властивостями матеріалу.

Методика дослідження. У роботі досліджувалися зразки заевтектичного силуміну, що містили евтектичний кремній у вигляді тонких пластин завтовшки 0,5 – 10 мкм. Для проведення експериментів використовували зливки, відлиті у графітові тиглі з контрольованими умовами охолодження. Твердіння зливка відбувалося від стінки тигля, що забезпечувало спрямоване формування евтектичної структури. Після завершення кристалізації отримані зливки розрізали на зразки, які піддавали металографічному, рентгеноструктурному та механічному аналізу.

Вібраційний вплив здійснювали на стадії кристалізації розплаву. Режими вібраційного навантаження включали частоти 20, 50 та 300 Гц із відповідним контролем мікротвердості та структурних змін. У всіх режимах контролювали амплітуду коливань та температурне поле, що забезпечувало відтворюваність експериментальних умов.

Рентгеноструктурний аналіз проводився з метою визначення фазового складу, ідентифікації модифікацій кремнію та встановлення змін у кристалічній решітці заевтектичного силуміну після вібраційної обробки. Для цього використовували дифрактометр із застосуванням монохроматизованого випромінювання $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$). Зйомку дифрактограм виконували в інтервалі кутів 2θ від 10° до 100° зі швидкістю сканування $0,02^\circ/\text{с}$. Ідентифікація фаз здійснювалася на

основі положень та інтенсивностей відбитків із залученням картотек: JCPDS 77-2111 для кубічної модифікації кремнію, JCPDS 80-0005 для гексагональної модифікації та JCPDS 41-4111 для політипних форм.

Мікротвердість зразків визначали методом Віккерса з метою виявлення впливу фазових перетворень на мікротвердість матеріалу.

Вихідні данні та результати дослідження. Для вивчення впливу вібраційної обробки на структуру та властивості заевтектичного силуміну досліджували зразки сплаву, що містять евтектичний кремній у вигляді пластин товщиною від 0,5 до 10 мкм.

Кристалізація зливка починається від стінки тигля (рис. 1). Механізм впливу вібрації полягає у тому, що вже за 20 Гц тонкі пластини евтектичного кремнію отримують ушкодження, частково обриваються, що спричиняє появу тріщин (рис 1, б). Наближення частоти вібраційної обробки до резонансної підсилює вищеописані ефекти – відбувається більше обривів і об'ємна частка псевдопервинних кристалів кремнію досягає свого максимуму. Крім того, зростання бічних граней кристалів кремнію збіднює рідину своєю присутністю оточуючу їх рідиною, що призводить до твердіння навколо них значних обсягів алюмінієвого розчину. Виникає так званий «ободок», який виявляється експериментально.

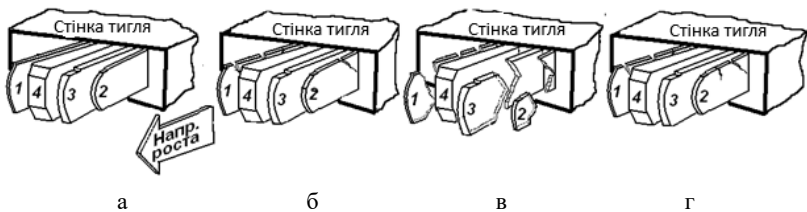


Рисунок 1 – Схема утворення зародків псевдопервинних кристалів кремнію в умовах підведених механічних вібрацій різної частоти: а – без вібрацій; б – частота 20 Гц (биття); в – частота 50 Гц (резонанс); г – частота 100...300 Гц (биття).

За умови підвищення частоти вібрації до 50 Гц різко зростає амплітуда коливань рідкої фази, і навантаження на виступаючі або частково відокремлені пластини кремнію значно посилюється. Це призводить до виникнення критичних напружень у пластинах, орієнтованих перпендикулярно до напрямку переміщення хвилі, через що більшість тонких пластин руйнується (рис. 1, в) або зміщується з позицій, які забезпечують нормальне кристалізаційне зростання. Зупинка росту цих пластин та їх часткове розчинення призводить до перенасичення розплаву кремнієм. Це, у свою чергу, стимулює

підсилений ріст бічних граней прилеглих неруйнуючих кристалів кремнію, формуючи псевдопервинні кристали з морфологією, близькою до первинних.

Цей процес може багаторазово повторюватися, особливо в областях зі значним розкидом товщини кремнієвих пластин і специфічним розташуванням габітусних площин відносно фронту хвилі. В результаті підвищення частоти вібрації до резонансного рівня посилює руйнування та реконструкцію евтектичних структур, що супроводжується збільшенням об'ємної частки псевдопервинних кристалів. Одночасно зростання бічних граней кристалів призводить до збіднення розплаву навколо них кремнієм, що спричиняє твердіння значних обсягів алюмінієвого розчину і формування експериментально зафіксованого «ободка» навколо кристалів.

За умови підвищення частоти вібрації понад 50 Гц (віддалення від резонансної) ефекти руйнування тонких пластин послаблюються, евтектична реакція наближається до нормальної, а виявлення потовщених пластин зменшується. Це свідчить про те, що явище посилення твердіння пов'язане з резонансним механізмом коливань.

Рентгеноструктурне дослідження (рис. 2 – 4) закристалізованих зразків після вібраційної обробки підтверджує описані механізми. На дифрактограмах зразків, які кристалізувалися під час вібраційної дії з частотою 50 Гц (рис. 3), виявлено додаткові лінії, які позначені як Si^{f} і відсутні у початкових зразках (JCPDS 77-2111, S.G.: Fd3m; параметр $a = 5,4199 \text{ \AA}$).

Ідентифікація за JCPDS 80-0005 на основі чотирьох відбитків ($d(\text{Å}) = 3,2909 - (100)$, $d(\text{Å}) = 2,9138 - (101)$, $d(\text{Å}) = 2,2697 - (102)$, $d(\text{Å}) = 1,2927 - (203)$) свідчить про утворення гексагональної модифікації кремнію з параметрами решітки: S.G.: P63mc; $a = 3,8 \text{ \AA}$; $c = 6,269 \text{ \AA}$; співвідношення $C = 1,6497$. Цей перехід аналогічний відомій трансформації кубічної алмазної решітки вуглецю в гексагональну форму лонсдейліту, який має вищу твердість у порівнянні з алмазом. Відповідно, зростання частки гексагонального кремнію призводить до підвищення мікротвердості первинних і псевдопервинних кристалів, що відображено у вимірах (таблиця 1).

Таблиця 1 – Залежність мікротвердості кремнію у заевтектичному сплаві Al-Si в залежності від частоти вібрації.

Частота вібрації	0 Гц	20 Гц	50 Гц	100 Гц	300 Гц
Значення мікротвердості	2458,6	2458,6	2458,6	2458,6	2458,6

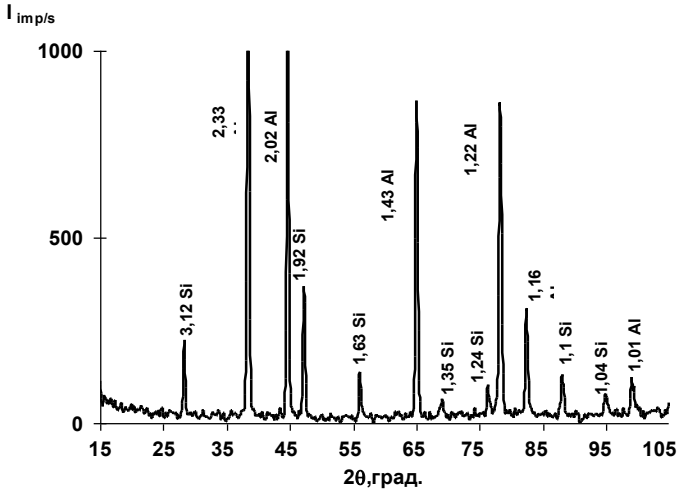


Рисунок 2 – Рентгеноспектральні дослідження впливу вібраційної обробки на заєвтектичний силумін без використання вібрації.

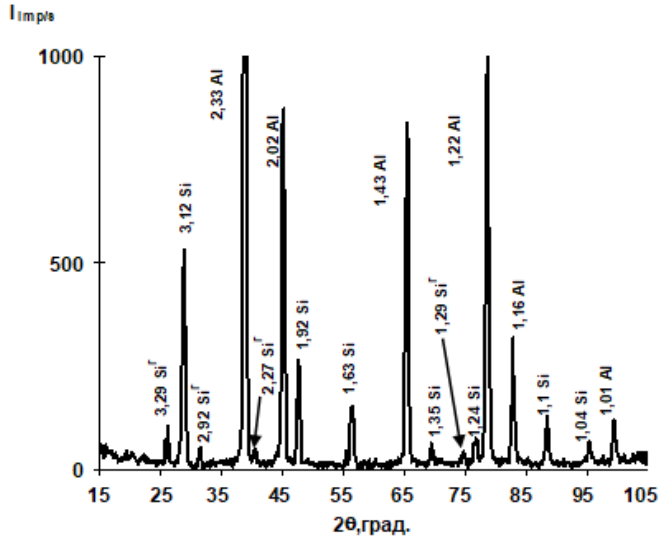


Рисунок 3 – Рентгеноспектральні дослідження впливу вібраційної обробки на заєвтектичний силумін з частотою вібрації 50 Гц.

Після вібраційної обробки з частотами вище 50 Гц інтенсивність ліній Si^γ знижується, натомість з'являються поліморфні модифікації кремнію Si^x (JCPDS 41-4111), що походять з високошвидкісного охолодження і мають не встановлену чітку кристалічну структуру (рис. 4). Згідно з літературою, Si^x відноситься до політипів кремнію, які характеризуються пониженою мікротвердістю. Хоча частка таких політипів невелика, їх присутність знижує загальну мікротвердість кристалів при частотах 100 – 300 Гц.

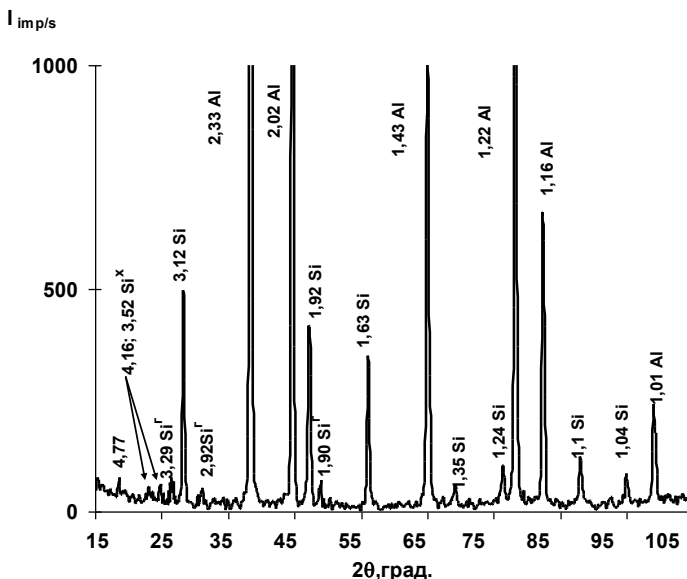


Рисунок 4 – Рентгеноспектральні дослідження впливу вібраційної обробки на заевтектичний силумін з частотою вібрації 300 Гц.

Таким чином, результати дослідження свідчать, що механічна вібрація з певною резонансною частотою активує в структурі евтектичного силуміну процеси руйнування тонких пластин кремнію, що формують умови для росту більш товстих псевдопервинних кристалів і розвитку гексагональної модифікації кремнію. Ці зміни призводять до помітного підвищення твердості матеріалу. У разі подальшого збільшення частоти вібрації посилення цих ефектів зменшується через формування інших модифікацій кремнію з нижчою твердою фазою. Цим пояснюється нелінійний зв'язок між частотою вібрації і твердістю.

Висновки

У результаті проведених досліджень встановлено, що вібраційна обробка розплаву заевтектичного силуміну істотно впливає на формування евтектичної структури та фазовий склад твердого зливка. Виявлено, що за частоти вібраційних коливань 20 Гц у тонких пластинах евтектичного кремнію виникають локальні пошкодження та обриви, які сприяють зародженню тріщин і створюють умови для перебудови структури. Досягнення резонансної частоти на рівні 50 Гц супроводжується масовим руйнуванням тонких пластин, зростанням бічних граней кристалів та утворенням псевдопервинних кристалів кремнію, що підтверджується рентгеноструктурними дослідженнями. Саме в цьому режимі зафіксовано фазовий перехід з кубічної модифікації кремнію у гексагональну, що призводить до зростання мікротвердості матеріалу.

Подальше підвищення частоти вібраційної обробки до 300 Гц зменшує інтенсивність процесів руйнування пластин і сприяє утворенню політипних форм кремнію з менш впорядкованою кристалічною структурою, що супроводжується зниженням механічних характеристик. Таким чином, вплив вібраційних коливань на заевтектичний силумін носить нелінійний характер і визначається наближенням частоти до резонансної області.

Резонансна вібраційна обробка є ефективним інструментом керування морфологією та фазовим складом евтектичних структур у силумінах. Вона дозволяє ініціювати процеси руйнування тонких пластин кремнію та стимулювати утворення гексагональної модифікації, що підвищує мікротвердість сплаву.

Отримані результати можуть бути використані для розробки технологій подрібнення структури заевтектичних алюмінієвих сплавів з метою покращення їх механічних і експлуатаційних властивостей.

Перелік посилань

1. Ebhota W. S., Jen T.-C. Effects of Modification Techniques on Mechanical Properties of Al-Si Cast Alloys. *Aluminium Alloys - Recent Trends in Processing, Characterization, Mechanical Behavior and Applications*. 2017. <https://doi.org/10.5772/intechopen.70391>.
2. Silicon morphology modification in the eutectic Al-Si alloy using mechanical mold vibration / N. Abu-Dheir et al. *Materials Science and Engineering: A*. 2005. Vol. 393, no. 1-2. P. 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.09.038>.
3. Selivorstov V., Dotsenko Y., Borodianskiy K. Influence of Low-Frequency Vibration and Modification on Solidification and Mechanical Properties of Al-Si Casting Alloy. *Materials*. 2017. Vol. 10, No. 5. P. 560. <https://doi.org/10.3390/ma10050560>.
4. Effect of ultrasonic and mechanical vibration treatments on evolution of Mn-rich phases and mechanical properties of Al-12Si-4Cu-1Ni-1Mg-2Mn piston

alloys / B. LIN et al. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2024. Vol. 34, no. 8. P. 2393–2414. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(24\)66549-0](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(24)66549-0).

5. Effects of mechanical vibration on the physical, metallurgical and mechanical properties of cast A308 (LM21) aluminum alloy / S. Yadav et al. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2022. Vol. 29, no. 6. P. 1206–1215. <https://doi.org/10.1007/s12613-020-2209-7>.

6. Microstructure and functionality of a uniquely graded super duplex stainless steel designed by a novel arc heat treatment method / V. A. Hosseini et al. *Materials Characterization*. 2018. Vol. 139. P. 390–400. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.03.024>

7. Silicon morphology modification in the eutectic Al–Si alloy using mechanical mold vibration / N. Abu-Dheir et al. *Materials Science and Engineering: A*. 2005. Vol. 393, no. 1-2. P. 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.09.038>

References

1. Ebhota, W. S., & Jen, T.-C. (2017). Effects of Modification Techniques on Mechanical Properties of Al-Si Cast Alloys. *Aluminium Alloys - Recent Trends in Processing, Characterization, Mechanical Behavior and Applications*. InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.70391>.

2. Abu-Dheir, N., Khraisheh, M., Saito, K., & Male, A. (2005). Silicon morphology modification in the eutectic Al–Si alloy using mechanical mold vibration. *Materials Science and Engineering: A*, 393(1-2), 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.09.038>.

3. Selivorstov, V., Dotsenko, Y., & Borodianskiy, K. (2017). Influence of Low-Frequency Vibration and Modification on Solidification and Mechanical Properties of Al-Si Casting Alloy. *Materials*, 10(5), 560. <https://doi.org/10.3390/ma10050560>.

4. Lin, B., He, X.-x., Xia, S.-c., Xiao, H.-q., Zhao, Y.-l., & Khanlari, K. (2024). Effect of ultrasonic and mechanical vibration treatments on evolution of Mn-rich phases and mechanical properties of Al–12Si–4Cu–1Ni–1Mg–2Mn piston alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 34(8), 2393–2414. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(24\)66549-0](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(24)66549-0).

5. Yadav, S., Tewari, S. P., Singh, J. K., & Ram, S. C. (2022). Effects of mechanical vibration on the physical, metallurgical and mechanical properties of cast A308 (LM21) aluminum alloy. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 29(6), 1206–1215. <https://doi.org/10.1007/s12613-020-2209-7>.

6. A. Hosseini, V., Karlsson, L., Örnek, C., Reccagni, P., Wessman, S., & Engelberg, D. (2018). Microstructure and functionality of a uniquely graded super duplex stainless steel designed by a novel arc heat treatment method. *Materials Characterization*, 139, 390–400. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.03.024>.

7. Abu-Dheir, N., Khraisheh, M., Saito, K., & Male, A. (2005). Silicon morphology modification in the eutectic Al–Si alloy using mechanical mold vibration. *Materials Science and Engineering: A*, 393(1-2), 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.09.038>.

N. O. Rott¹, Ph. D. (Tech.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-3839-6405

Z. V. Sazanishvili^{1,*}, Ph. D. (Tech.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-4138-9238

¹ Dnipro University of Technology

* Corresponding author: sazanishvili.z.v@nmu.one

INFLUENCE OF VIBRATION TREATMENT ON THE STRUCTURE FORMATION AND PROPERTIES OF HYPEREUTECTIC SILUMIN

Abstract. The article presents the results of a comprehensive study of the influence of vibration treatment on the crystallization processes, structure formation, and property changes of hypereutectic silumin. The research was carried out on aluminum alloy samples of the Al–Si system, in which eutectic silicon was present in the form of thin plates with a thickness ranging from 0.5 to 10 μm . To reproduce controlled solidification conditions, castings were produced in graphite crucibles. During solidification, vibration oscillations in the frequency range of 20–300 Hz were applied to the melt, which made it possible to investigate the effects from low-frequency beating to resonance and over-resonance modes. It was established that at a frequency of 20 Hz thin silicon plates undergo damage, partially detach, and form nuclei of pseudo-primary crystals. The most pronounced changes occur at a frequency of 50 Hz, when resonance interaction of oscillations with the melt is realized. In this regime, massive fracture of the plates, intensive growth of silicon crystal side facets, formation of a significant volume fraction of pseudo-primary crystals, and appearance of a characteristic “rim” around them were observed. X-ray diffraction analysis revealed the occurrence of additional reflections identified as a hexagonal modification of silicon, which forms analogously to the well-known transformation of the cubic diamond lattice into lonsdaleite. It was found that the presence of the hexagonal phase contributes to an increase in the microhardness of the alloy. With a further increase in vibration frequency up to 300 Hz, the effects of plate destruction were significantly reduced, while polytypic silicon forms with lower hardness appeared in the structure. This led to an overall decrease in the strengthening effect of vibration treatment. As a result, a nonlinear relationship between the frequency of applied vibrations and the morphological and phase transformations in the Al–Si system was established. Resonance treatment proved to be the most effective for targeted structure refinement and improvement of the properties of hypereutectic silumin. The obtained results can be used for the development of technologies for controlling the crystallization of aluminum alloys in foundry production in order to enhance their mechanical and operational properties.

Key words: aluminum alloys, hypereutectic silumin, eutectic silicon, vibration treatment, phase transformations, microhardness, structure formation.

For citation: Rott, N. O. & Sazanishvili, Z. V. (2025). Influence of vibration treatment on the structure formation and properties of hypereutectic silumin. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 39, 264-273. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2025-39-15>

Рукопис надійшов до редакції / Received 11.08.2025

Рекомендовано до друку / Accepted 21.10.2025